DK



LOS GENES SON MOLÉCULAS EGOÍSTAS





LA ENERGÍA SOLAR ES ILIMITADA Y GRATUITA



EL ALIMENTO ES LA CUESTIÓN CANDENTE

TODAS LAS COSAS DE LA NATURALEZA TIENEN ALGO DE MARAVILLOSO



EL LIBRO DE LA ECOLOGIA

TODA LA ACTIVIDAD CORPORAL DEPENDE DE LA TEMPERATURA

LAS PLANTAS VIVEN EN UNA ESCALA TEMPORAL DISTINTA

PIENSA GLOBALMENTE, ACTÚA LOCALMENTE













GRANDES IDEAS, EXPLICACIONES SENCILLAS

ESTAMOS JUGANDO A LOS DADOS CON EL MEDIO NATURAL

HA LLEGADO LA HORA DE QUE LA CIENCIA SE OCUPE DE LA TIERRA

EL LIBRO DE LA ECOLOGÍA





DK LONDON

EDICIÓN SÉNIOR
Helen Fewster y Camilla Hallinan

EDICIÓN DE ARTE SÉNIOR
Duncan Turner

ILUSTRACIÓN
James Graham

EDICIÓN DE CUBIERTA
Emma Dawson

DISEÑO DE CUBIERTA
Surabhi Wadhwa-Gandhi

DISEÑO DE CUBIERTA SÉNIOR
Sophia MTT

COORDINACIÓN DE PREPRODUCCIÓN
Andy Hilliard

PRODUCCIÓN SÉNIOR
Meskerem Berhane

COORDINACIÓN EDITORIAL
Angeles Gavira Guerrero

COORDINACIÓN DE ARTE
Michael Duffy

SUBDIRECCIÓN DE PUBLICACIONES
Liz Wheeler

DIRECCIÓN DE ARTE
Karen Self

DIRECCIÓN DE DISEÑO
Philip Ormerod

DIRECCIÓN DE PUBLICACIONES
Jonathan Metcalf

DK DELHI

EDICIÓN DE ARTE SÉNIOR
Ira Sharma

EDICIÓN DE ARTE DEL PROYECTO
Vikas Sachdeva

EDICIÓN DE ARTE
Shipra Jain, Sourabh Challariya
y Debjyoti Mukherjee

ASISTENCIA DE EDICIÓN DE ARTE
Shreya Singal, Vidushi Gupta y Amrai Dua

EDICIÓN SÉNIOR
Janashree Singha

EDICIÓN
Aadithyan Mohan K.

ASISTENCIA EDITORIAL
Rishi Bryan, Tanya Singhal y Nonita Saha

DISEÑO DE CUBIERTA
Suhita Dharamjit

MAQUETACIÓN SÉNIOR
Harish Aggarwal y Jagtar Singh

MAQUETACIÓN
Mohammad Rizwan y Bimlesh Tiwary

ICONOGRAFÍA
Vishal Ghavri

EDICIÓN DE CUBIERTA
Priyanka Sharma

EDICIÓN DE CUBIERTA SÉNIOR
Saloni Singh

COORDINACIÓN DE ICONOGRAFÍA
Taiyaba Khatoon

DIRECCIÓN DE PREPRODUCCIÓN
Balwant Singh

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN
Pankaj Sharma

COORDINACIÓN EDITORIAL
Soma B. Chowdhury

COORDINACIÓN DE ARTE SÉNIOR
Arunesh Talapatra

TOUCAN BOOKS

DIRECCIÓN EDITORIAL
Ellen Dupont

DISEÑO SÉNIOR
Thomas Keenes

EDICIÓN SÉNIOR
Scarlett O'Hara

EDICIÓN
John Andrews, Alethea Doran, Sue George,
Guy Croton, Cathy Meeus, Abigail Mitchell,
Fiona Plowman, Dorothy Stannard
y Rachel Warren Chadd

ASISTENCIA EDITORIAL
Isobel Rodel

INDEXACIÓN
Marie Lorimer

CORRECCIÓN DE PRUEBAS
Richard Beatty

TEXTOS ADICIONALES
Shannon Webber y Marcus Weeks

Estilismo de
STUDIO 8

Publicado originalmente en Gran Bretaña
en 2019 por Dorling Kindersley Limited,
80 Strand, London, WC2R 0RL

Parte de Penguin Random House

Título original: *The Ecology Book*
Primera edición 2019

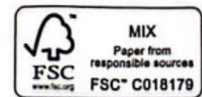
Servicios editoriales: deleatur, s.l.
Traducción: Antón Corriente Basús

Prólogo © 2019 Tony Juniper

ISBN: 978-1-4654-8679-0

Impreso y encuadernado en Malasia

UN MUNDO DE IDEAS
www.dkespañol.com



COLABORADORES

JULIA SCHROEDER (ASESORA)

Doctora en Ecología Animal por la Universidad de Groningen (Países Bajos), entre 2012 y 2017 Schroeder trabajó al frente de un equipo de investigación del Instituto Max Planck de Ornitología en Alemania, donde estudió la ecología del comportamiento social. Actualmente es investigadora; asimismo, enseña biología evolutiva en el Imperial College de Londres.

CELIA COYNE

Escritora y editora independiente, Coyne vive en Christchurch (Nueva Zelanda). Es la autora de *Earth's riches* y *The power of plants*, y escribe y edita artículos sobre ciencia e historia natural para revistas, periódicos, páginas web y libros, en Reino Unido, Australia y Nueva Zelanda. Su propósito es hacer los temas científicos accesibles al lector neófito.

JOHN FARNDON

Autor de cientos de libros sobre ciencia y naturaleza tanto para niños como para adultos, Farndon estudió Geografía en la Universidad de Cambridge. Farndon ha escrito extensamente sobre ciencias de la Tierra y el medio ambiente, con una atención especial a la ecología y la conservación. Entre sus libros figuran *The oceans atlas, Tu primera enciclopedia de los animales, How the earth works* y *Rocas, minerales y gemas*.

TIM HARRIS

Después de estudiar los glaciares de Noruega en la universidad, Harris recorrió el mundo en busca de especies raras y paisajes extraordinarios. Ha explorado las dunas del desierto del Namib, ha escalado el volcán Popocatépetl en México, ha acampado en la pluvisilva de Sumatra y ha rastreado el mar helado de Ojotsk, en Rusia. Fue editor adjunto de la revista británica *Birdwatch*, y ha escrito libros sobre temas de la naturaleza para niños y adultos.

DEREK HARVEY

Naturalista y profesor con un interés especial por la biología evolutiva, Harvey se licenció en Zoología en la Universidad de Liverpool. Ha enseñado a una generación de biólogos, y ha dirigido expediciones de alumnos a Costa Rica, Madagascar y Australasia. Actualmente se dedica a escribir y trabajar como asesor para libros de ciencias e historia natural.

TOM JACKSON

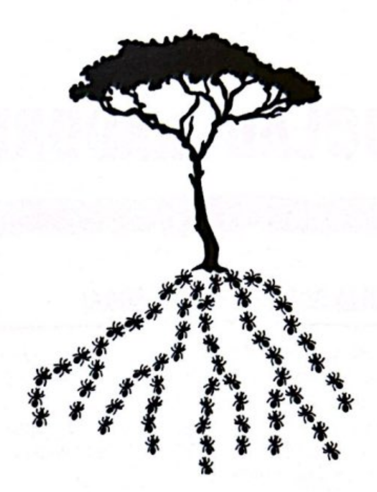
Jackson es autor de unas doscientas obras de no ficción para adultos y niños, y ha contribuido a muchas otras. Estudió Zoología en la Universidad de Bristol (Reino Unido), y trabajó como conservacionista en zoológicos antes de dedicarse a escribir sobre historia natural y temas científicos.

ALISON SINGER

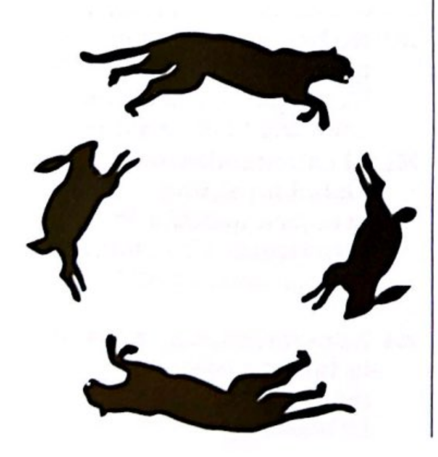
Singer es candidata al doctorado en Sostenibilidad Comunitaria en la Universidad Estatal de Michigan (EE UU), donde estudia narración y comunicación científica. Singer tiene una amplia formación literaria, ecológica y en ciencias sociales, y ha trabajado como educadora tanto para sociedades benéficas ambientales como para la Agencia de Protección Ambiental de EE UU.

CONTENIDO





ORDENANDO EL MUNDO NATURAL

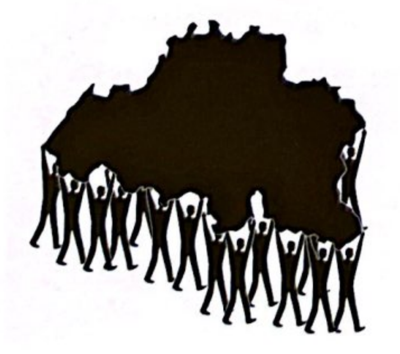


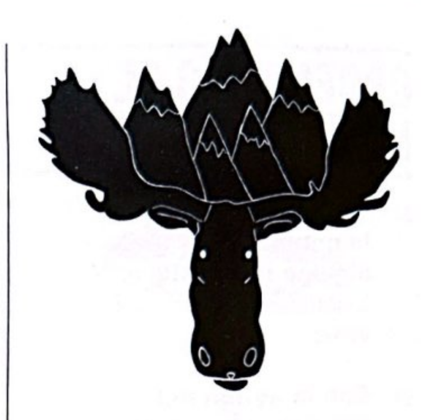
LA DIVERSIDAD DE LA VIDA



ECOSISTEMAS

ORGANISMOS EN UN ENTORNO CAMBIANTE

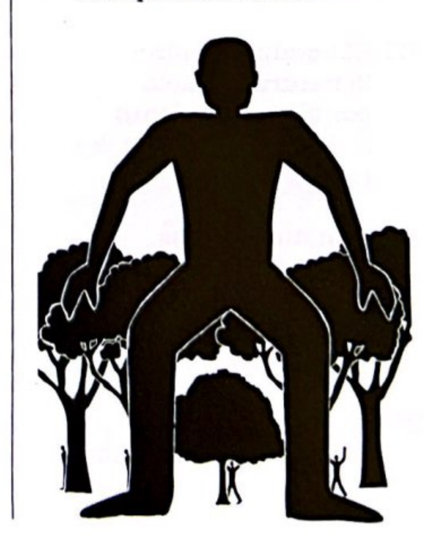


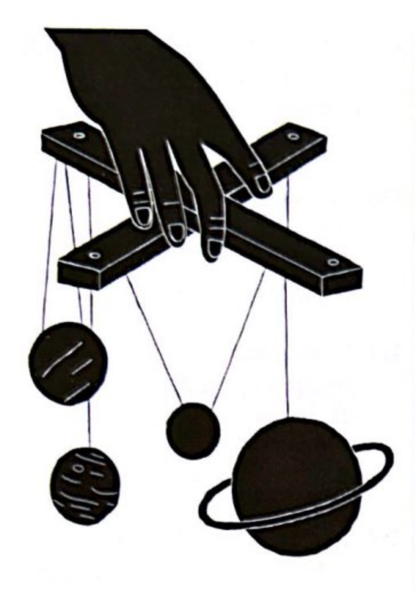


LA TIERRA VIVA

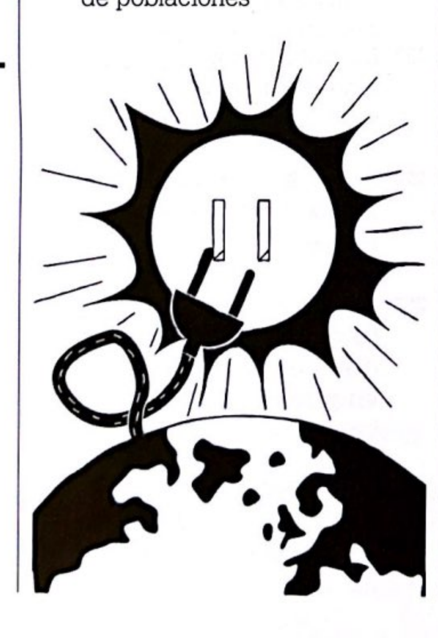
EL FACTOR HUMANO







ECOLOGISMO Y CONSERVACIÓN



PROLOGO

De niño, la naturaleza me fascinaba: aves, mariposas, plantas, reptiles, fósiles, ríos, el clima y muchas otras cosas. Las pasiones de la infancia me pusieron en la senda de una vida como naturalista y del trabajo en el ámbito de la ecología, estudiando el mundo natural y promoviendo la conservación del medio. He trabajado como ornitólogo de campo, escritor, activista, defensor de políticas y asesor medioambiental, intereses diversos pero vinculados todos al asunto único de la ecología.

La ecología es un campo vasto, e implica muchas disciplinas necesarias para comprender las relaciones entre los distintos organismos vivos y el medio físico de aire, agua y roca en el que viven inmersos. Desde el estudio de los microorganismos del suelo hasta el del papel de los polinizadores, y desde el de los ciclos del agua hasta el del sistema climático de la Tierra, la ecología se ramifica en muchas áreas especializadas, y también agrupa ramas diversas de la ciencia, entre ellas la zoología, la botánica, la matemática, la química y la física, además de ciertos aspectos de las ciencias sociales –la economía, en particular–, a la vez que plantea cuestiones profundas de índole filosófica y ética.

Debido al modo fundamental en que el mundo humano depende de unos sistemas naturales sanos, algunas de las cuestiones políticas más importantes de nuestro tiempo son cuestiones ecológicas: el cambio climático, los efectos del daño a los ecosistemas, la desaparición de la vida salvaje y el agotamiento de recursos como la vida marina, el agua dulce y el suelo. Todos estos cambios ecológicos tienen implicaciones para las personas, y cada día son más urgentes.

Considerando la enorme importancia de la ecología para el mundo actual, y los muchos hilos de pensamiento e ideas que hay que tejer para una comprensión cabal del tema, estoy encantado de que Dorling Kindersley haya decidido lanzar *El libro de la ecología*, que plantea los conceptos clave que han dado forma a nuestra comprensión de cómo funcionan los asombrosos sistemas naturales de la Tierra. En las páginas que siguen, los lectores descubrirán la historia de los conceptos ecológicos, los pensadores más destacados y las perspectivas diversas desde las que enfocaron las cuestiones a las que querían dar respuesta. Algo que distingue este libro es el modo en que se presenta un contenido rico, imprescindible y atractivo. El diseño claro, con imágenes, ilustraciones y citas, transmite una gran cantidad de información y conocimiento, permitiendo al lector una comprensión rápida de muchas ideas ecológicas y de sus autores, entre otras: la hipótesis Gaia, de James Lovelock; las advertencias sobre una inminente extinción masiva, de Norman Myers; o el trabajo de Rachel Carson para revelar los efectos de los pesticidas tóxicos.

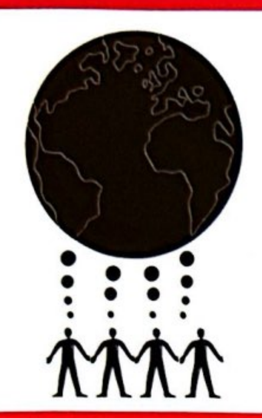
La diversa información que incluyen las páginas que siguen no podría ser más importante. Si bien los titulares y los debates públicos sugieren que la política, la tecnología y la economía son las fuerzas vitales que configuran nuestro futuro común, en último término, la ecología es el contexto más importante a la hora de determinar las perspectivas de la sociedad, e incluso el futuro de la civilización misma.

Espero que encuentren en *El libro de la ecología* una visión iluminadora del que no solo es el tema más decisivo de todos, sino también el más interesante.

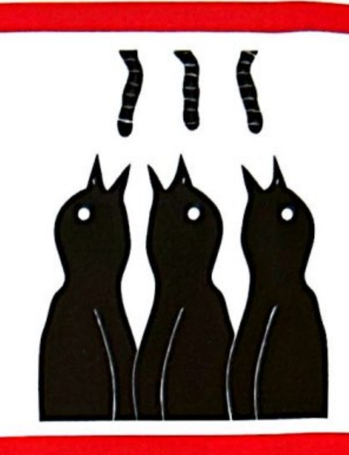
Tony Juniper
Ambientalista

INTRODU

CCION







Para los primeros humanos, un conocimiento rudimentario de la ecología –cómo se relacionan unos seres vivos con otros– era cuestión de vida o muerte. Sin saber por qué los animales pastan en determinados lugares o la fruta crece en otros, nuestros antepasados no habrían sobrevivido y evolucionado.

La interacción de animales y plantas entre sí y con el entorno interesó a los antiguos griegos. En el siglo IV a.C., Aristóteles y su discípulo Teofrasto elaboraron teorías sobre el metabolismo animal y la regulación térmica, diseccionaron huevos de aves para ver cómo crecían y crearon una escala de la vida de once niveles, primer intento de clasificar los seres vivos. Aristóteles explicó también cómo unos animales se alimentan de otros, lo cual fue la primera descripción de la cadena trófica.

En la Edad Media (476–1500), la Iglesia católica rechazó el nuevo pensamiento científico, y el avance del conocimiento ecológico fue muy lento. En el siglo XVI, la exploración marítima, unida a avances como la invención del microscopio, condujeron al descubrimiento de nuevas formas de vida y estimularon el afán por conocerlas. En *Systema naturae*, el botánico sueco Carlos Linneo desarrolló un sistema de clasificación que fue el primer intento científico de nombrar especies y agruparlas por parentesco. Durante esta época, el «esencialismo» –la idea de que las características de cada especie eran inalterables– siguió dominando el pensamiento occidental.

Grandes avances

El esencialismo empezó a ser cuestionado por los hallazgos geológicos de finales del siglo XVII e inicios del siglo XVIII. Se observó que algunas especies fósiles desaparecían repentinamente del registro geológico y eran sustituidas por otras, indicio de que los organismos cambian con el tiempo, e incluso se extinguen. En 1809, el francés Jean-Baptiste Lamarck propuso la primera teoría coherente de la evolución, la de la transmutación de las especies por la herencia de los caracteres adquiridos. Sin embargo, fueron Charles Darwin –influido por sus vivencias en la épica expedición del *Beagle*– y Alfred Russel Wallace quienes desarrollaron, unos cincuenta años más tarde, el concepto de evolución por selección natural, la teoría que explica cómo los organismos evolucionan a lo largo de generaciones para adaptarse mejor a su entorno. Darwin y Wallace no comprendían el mecanismo por el cual esto ocurre, pero los experimentos de Gregor Mendel con guisantes revelaron factores hereditarios, los llamados genes, que supusieron un gran salto adelante para la teoría evolutiva.



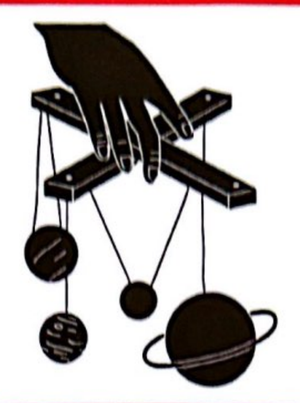
Hay unos cuatro millones de especies animales y vegetales en el mundo. Cuatro millones de soluciones diferentes a los problemas de mantenerse con vida.
David Attenborough



Nuevos vínculos

La relación entre los organismos y el medio y entre unas y otras especies dominaron los estudios ecológicos de principios del siglo XX. Se desarrollaron los conceptos de cadena y red tróficas (quién se alimenta de quién en un hábitat dado) y de nicho ecológico (el papel de un organismo en su medio), y, en 1935, Arthur Tansley introdujo el concepto de ecosistema, la relación interactiva entre los seres vivos y su medio. Los ecólogos posteriores desarrollaron modelos ma-







temáticos para predecir la dinámica de poblaciones en ecosistemas, y las teorías evolutivas siguieron progresando al descubrirse la estructura del ADN, así como el «vehículo» evolutivo que proporcionan las mutaciones al replicarse este.

Nuevas fronteras

Las mejoras tecnológicas abrieron nuevas posibilidades. Los microscopios electrónicos obtienen imágenes de la mitad del ancho de un átomo de hidrógeno, y, mediante programas informáticos, se han podido analizar los sonidos producidos por murciélagos y ballenas, de frecuencias más altas o bajas que las audibles para el oído humano. Las cámaras trampa y los detectores de infrarrojos fotografían y filman animales nocturnos, y el seguimiento por satélite de las aves rastrea sus migraciones.

En el laboratorio, el análisis del ADN de heces, pelo y plumas indica a qué especie pertenecen, y arroja luz sobe la relación entre distintos seres vivos. Para los ecólogos, hoy es más fácil que nunca reunir datos, con la ayuda de un creciente colectivo de ciudadanos científicos.

Nuevas inquietudes

La ecología fue impulsada en un primer momento por el deseo de conocer. Más tarde sirvió para explotar mejor el mundo natural y satisfacer las necesidades humanas. Con el tiempo, las consecuencias de dicha explotación quedaron cada vez más claras. La deforestación se consideraba un problema ya en el siglo XVIII, y la contaminación del aire y el agua eran evidentes en las naciones industrializadas del siglo XIX. En 1962, el libro de Rachel Carson *Primavera silenciosa* alertó al mundo de los peligros de los pesticidas; y, seis años después, Gene Likens demostró el vínculo entre las emisiones de centrales termoeléctricas, la lluvia ácida y las muertes de peces.

En 1985, un equipo de científicos en la Antártida descubrió la pérdida drástica del ozono atmosférico sobre el continente. G. Evelyn Hutchinson había señalado el vínculo entre los gases de efecto invernadero y el calentamiento de la atmósfera baja ya en 1947, pero se tardó décadas en lograr el consenso científico sobre las causas humanas del cambio climático.

El futuro

La ecología moderna ha recorrido un largo camino desde su reconocimiento como ciencia, y en la actualidad se nutre de muchas otras disciplinas. Además de la zoología, la botánica y sus subdisciplinas, recurre a la geología, la geomorfología, la climatología, la química, la física, la genética, la sociología y otras. La ecología influye en las decisiones de gobiernos locales y nacionales sobre urbanismo, transporte, industria y crecimiento económico. Los desafíos del cambio climático, la subida del nivel del mar, la destrucción de hábitats, la extinción de especies, el plástico y otras formas de contaminación, así como la amenaza de una crisis del agua, son amenazas graves para la civilización humana, y exigen respuestas políticas radicales basadas en una ciencia cabal. La ecología proporcionará las respuestas. Aplicarlas será cosa de los gobiernos. ■



Hasta los vastos y misteriosos ámbitos del mar nos devuelven a la verdad fundamental de que nada vive por sí mismo.
Rachel Carson



HISTORIA
LA EVOLU

DE
CION

James Hutton presenta su teoría de que **la Tierra es mucho más antigua** de lo que se creía, y de que la corteza terrestre cambia continuamente.



1785

En *Théorie de la terre*, **Georges Cuvier** defiende que los **fósiles** son los restos de **criaturas extintas**, exterminadas por acontecimientos catastróficos.



1813

El *Beagle* emprende la circunnavegación del globo, con **Charles Darwin** a bordo como naturalista de la expedición. El viaje aportará a Darwin la información que inspirará su teoría de la **evolución por selección natural**.



1831

1809



Jean-Baptiste Lamarck publica *Filosofía zoológica*, donde afirma que los animales adquieren características por usar o no usar distintas partes del cuerpo, lo cual causa **mutaciones** a lo largo de las generaciones.

1823



La paleontóloga **Mary Anning** halla el primer **esqueleto** intacto de un **plesiosaurio**.

Los mitos, las religiones y la filosofía antiguos reflejan la fascinación por el origen del mundo y por el lugar del hombre en la historia de la vida en la Tierra. En Occidente, el cristianismo mantuvo que todos los animales y todas las plantas eran el resultado de una creación perfecta y que, en la jerarquía del ser, ninguna especie podía variar. Esta idea de la inmutabilidad de las especies se conoce como esencialismo.

En el siglo XVIII, la Ilustración comenzó a desafiar las creencias cristianas ortodoxas. El zoólogo francés Jean-Baptiste Lamarck rechazó la noción bíblica imperante de una Tierra de solo unos pocos miles de años de edad, afirmando que los seres vivos habían cambiado desde formas simples a otras más complejas a lo largo de millones de años, y que la «transmutación» de las especies era la fuerza que impulsaba dicho cambio. Lamarck especuló que los caracteres adquiridos por los animales durante su vida eran heredados por la generación siguiente: el cuello de las jirafas, por ejemplo, se alargaba ligeramente debido al esfuerzo de alcanzar las hojas altas, y este rasgo pasaba a la descendencia, con el resultado, a lo largo de muchas generaciones, de que las jirafas presentaban cuellos cada vez más largos.

Las pruebas fósiles de formas de vida extintas con rasgos semejantes a los de sus descendientes modernos, encontrados por geólogos pioneros como Georges Cuvier, apuntaban también a unos orígenes mucho más antiguos de la Tierra. Al mismo tiempo, James Hutton y Charles Lyell defendían que los rasgos geológicos se podían explicar por los procesos constantes de la erosión y la sedimentación, en lo que se llamó «uniformismo». Se trata de procesos lentos, de modo que la historia de la Tierra debía de ser mucho más larga de lo que se había creído.

Selección natural

En 1858, Charles Darwin y Alfred Russel Wallace presentaron un escrito que cambiaría la biología para siempre. Las observaciones de Darwin durante el viaje del *Beagle* (1831–1836), su correspondencia con otros naturalistas y la influencia de Thomas Malthus inspiraron a Darwin la idea de que la evolución tenía lugar por medio de lo que llamó «selección natural». Darwin pasó veinte años reuniendo datos para fundamentarla, pero, al escribirle Wallace explicando la misma idea, se vio obligado a publicarla. El resultado, *El origen de las especies*, causó indignación.

El trabajo de **Gregor Mendel** detalla sus descubrimientos al experimentar con guisantes en *Experimentos sobre hibridación de plantas*, que pone los cimientos de la **genética**.



1866

La obra *El gen egoísta*, del biólogo evolutivo **Richard Dawkins**, ofrece una **perspectiva nueva** de la **evolución**, al considerar el gen en lugar de la especie o el grupo.



1976

1859

Darwin elabora sus teorías sobre la evolución en ***El origen de las especies***, un éxito inmediato.

1953



Crick y Watson anuncian su descubrimiento de la **estructura del ADN** en el pub *The Eagle*, en Cambridge (Reino Unido).

2003



El **Proyecto Genoma Humano** produce el primer mapa genético del *Homo sapiens*.

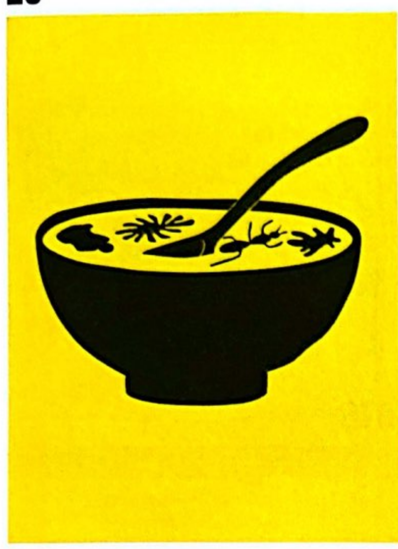
Aunque la idea de la evolución logró una aceptación general, no se conocía el mecanismo que hacía funcionar la selección natural. En 1866, el monje del Imperio austriaco Gregor Mendel hizo una aportación decisiva a la genética al publicar sus hallazgos sobre la herencia en los guisantes. Mendel describió cómo pasan los rasgos dominantes y recesivos de una a otra generación por medio de «factores» invisibles, hoy llamados genes.

El redescubrimiento de la obra de Mendel en 1900 inició un debate encendido en un principio entre sus seguidores y muchos darwinianos. Entonces se creía que la evolución se basaba en la selección de variables pequeñas que se mezclaban, pero las variaciones de Mendel claramente no hacían tal cosa. Tres décadas más tarde, el genetista Ronald Fisher y otros mantuvieron que las dos escuelas de pensamiento eran complementarias, no contradictorias. En 1942, Julian Huxley articuló la síntesis entre la genética de Mendel y la selección natural de Darwin en su obra *La evolución: síntesis moderna*.

La doble hélice

Avances tecnológicos como la cristalografía de rayos X condujeron a nuevos hallazgos en las décadas de 1940 y 1950, así como al nacimiento de una nueva disciplina, la biología molecular. En 1944, el químico Oswald Avery identificó el ácido desoxirribonucleico (ADN) como el agente de la herencia. Rosalind Franklin y Raymond Gosling fotografiaron filamentos de la molécula del ADN en 1952; y, al año siguiente, James Watson y Francis Crick confirmaron la estructura de doble hélice. Crick mostró que la información genética está «escrita» en las moléculas de ADN. Los errores que se producen al copiarse el ADN a sí mismo causan mutaciones, la materia prima de la evolución. En la década de 1980 era posible ya cartografiar y manipular los genes de individuos y de especies. En la de 1990, el mapa del genoma humano puso los cimientos de la investigación médica en terapia genética.

Los ecólogos también buscan determinar si los genes influyen en el comportamiento. En 1964, William D. Hamilton popularizó el concepto de selección de parentesco para explicar el comportamiento altruista en los animales. En *El gen egoísta* (1976), Richard Dawkins reforzó el enfoque centrado en el gen. Está claro que algunos aspectos de la biología evolutiva seguirán siendo objeto de debate mientras los ecólogos siguen desarrollando la teoría de Darwin. ■



EL TIEMPO ES INSIGNIFICANTE, Y NUNCA ES OBSTÁCULO PARA LA NATURALEZA

PRIMERAS TEORÍAS DE LA EVOLUCIÓN

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Conde de Buffon (1707–1788), **Jean-Baptiste Lamarck** (1744–1829)

ANTES
1735 El botánico sueco Carlos Linneo publica *Systema naturae*, sistema de clasificación biológica que servirá para determinar el linaje de las especies.

1751 En *Système de la nature*, Pierre Louis Moreau de Maupertuis afirma que los rasgos pueden heredarse.

DESPUÉS
1831 Etienne Geoffroy Saint-Hilaire escribe que un cambio repentino en el medio puede causar el desarrollo de una nueva especie a partir de otra ya existente.

1844 En *Vestiges of the natural history of creation*, el geólogo Robert Chambers afirma que las especies más complejas evolucionaron a partir de criaturas simples.

Hasta el siglo XVIII, la creencia en la inmutabilidad de las especies, o esencialismo, fue generalizada. Dos fenómenos vinieron a desacreditar tal creencia: el movimiento intelectual conocido como la Ilustración (*c.* 1715–1800), y la revolución industrial (1760–1840).

La Ilustración se caracterizó por el progreso científico, así como por cuestionar la ortodoxia religiosa y postulados tales como que Dios creó la Tierra y todos los seres vivos en siete días. Con el impulso de la revolución industrial, la construcción de canales, líneas de ferrocarril, minas y canteras obligó a perforar y excavar estratos de roca donde se hallaron miles de fósiles, en su mayoría de animales y plantas nunca antes vistos y que ya no existían. Esto indicaba que la vida había comenzado mucho antes de 4400 a.C., fecha aproximada de la creación, según se deducía de las fuentes bíblicas.

Adaptación animal

Hacia el último cuarto del siglo XVIII, el científico francés Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon, indignó a las autoridades eclesiásticas al afirmar que la Tierra era mucho más antigua de lo que daba a entender la Biblia. Buffon creía que se había formado a partir de material fundido arrancado al Sol por un cometa, y que había tardado 70 000 años en enfriarse (una cifra muy corta, de hecho). Al enfriarse la Tierra, aparecieron especies que se extinguieron y fueron sustituidas por los antepasados de las hoy conocidas. Observando las similitudes entre animales como leones, tigres y gatos, Buffon dedujo que unas doscientas especies de cuadrúpedos habrían evolucionado a partir de solo 38 especies ancestrales, y también creía que las diferencias de forma y tamaño del cuerpo en especies emparentadas se debían a la vida en ambientes distintos.



La naturaleza es el sistema de leyes establecido por el creador para la existencia de las cosas y la sucesión de las criaturas.
Conde de Buffon



Véase también: Extinción y cambio 22 ▪ Uniformismo 23 ▪ Evolución por selección natural 24–31 ▪ Las reglas de la herencia 32–33

En 1800, Jean-Baptiste Lamarck fue más allá. En una conferencia en el Museo Nacional de Historia Natural, en París, el naturalista francés defendió que la descendencia heredaba los rasgos adquiridos por los animales durante su vida, y que la acumulación de cambios a lo largo de muchas generaciones podía alterar radicalmente la anatomía.

Lamarck escribió varios libros en los que desarrolló su idea de la transmutación. Argumentaba, por ejemplo, que el hecho de usar o no usar una parte del cuerpo, con el tiempo, la volvía más fuerte o débil, o bien mayor o menor. Los antepasados de los topos, por ejemplo, probablemente tenían buena vista, pero esta facultad, inútil bajo tierra, se deterioró a lo largo de las generaciones. Análogamente, las jirafas desarrollaron gradualmente cuellos más largos para poder alcanzar las hojas altas de los árboles.

Impulsores de la evolución

Las ideas de Lamarck sobre la herencia de caracteres adquiridos fueron parte de una primera concepción más amplia de la evolución. Lamarck creía también que las formas de vida más antiguas y simples habían surgido de materia no viva, e identificó dos «fuerzas vitales» principales que impulsaban el cambio evolutivo: una, el progreso de lo simple a lo complejo; la otra, la herencia de los caracteres adquiridos, que ayuda a adaptarse mejor al entorno. Al desarrollar Darwin la teoría de la evolución por selección natural, rechazó muchas de las ideas de Lamarck, pero ambos coincidían en que la vida compleja había evolucionado a lo largo de un periodo inmenso de tiempo. ■

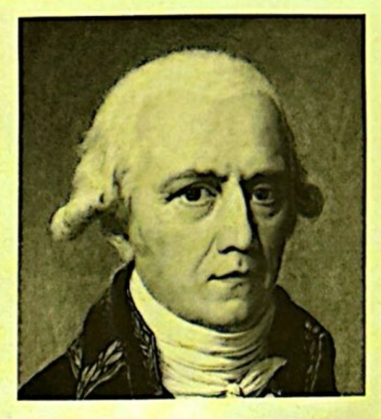


[…] el uso continuado de un órgano lo refuerza, desarrolla y agranda de modo gradual.
Jean-Baptiste Lamarck






Los hallazgos fósiles cambiaron las ideas sobre cómo empezó la vida. Mary Anning descubrió el primer plesiosaurio articulado *(Plesiosaurus dolichodeirus)* en Dorset (Inglaterra), en 1823.



Jean-Baptiste Lamarck

Nacido en 1744, Lamarck se formó en una escuela jesuita antes de ingresar en el ejército. Obligado por una lesión a dejar la vida militar, estudió medicina y cultivó su pasión por las plantas, trabajando en el Jardin du Roi, en París. Con el apoyo del conde de Buffon, Lamarck fue elegido miembro de la Academia de las Ciencias en 1779. Durante la Revolución Francesa (1789–1799), el edificio principal del jardín se convirtió en el nuevo Museo Nacional de Historia Natural, y Lamarck estuvo a cargo del estudio de los insectos, gusanos y organismos microscópicos. Fue él quien acuñó el término «invertebrado», y se valió a menudo de las formas más simples de tales especies para ilustrar la escala del progreso evolutivo. No obstante, su obra fue polémica, y él murió en la pobreza en 1829.

Obras principales

1802 *Investigaciones sobre la organización de los cuerpos vivos.*
1809 *Filosofía zoológica.*
1815–1822 *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres.*



UN MUNDO ANTERIOR AL NUESTRO, DESTRUIDO POR UNA CATÁSTROFE

EXTINCIÓN Y CAMBIO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Georges Cuvier (1769–1832)

ANTES
Finales del siglo XV
Leonardo da Vinci afirma que los fósiles son restos de seres vivos, no formaciones espontáneas.

Década de 1660 El inglés Robert Hooke afirma que los fósiles proceden de criaturas extintas, pues no existen formas similares en la Tierra hoy.

DESPUÉS
1841 El anatomista inglés Richard Owen llama «dinosaurios» a los grandes fósiles de reptiles.

1859 En *El origen de las especies*, Darwin explica la evolución por selección natural.

1980 Los estadounidenses Luis y Walter Alvarez presentan pruebas del impacto de un asteroide en la época de la extinción de los dinosaurios.

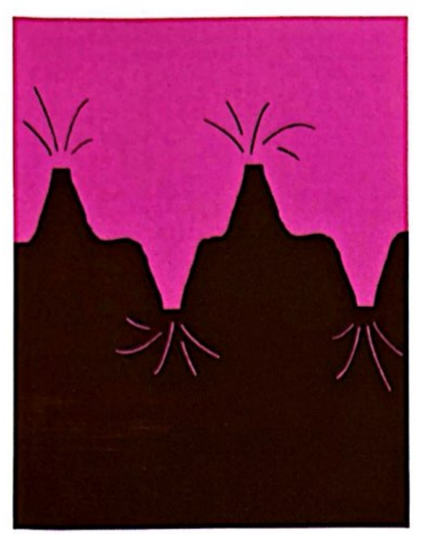
En los inicios del estudio de los fósiles, muchos negaban que pudiera tratarse de especies extintas. No comprendían que Dios pudiera haber creado y destruido otros seres antes de los humanos, y argumentaban que las especies fósiles desconocidas podían vivir aún en algún lugar de la Tierra. A finales del siglo XVIII, el zoólogo francés Georges Cuvier estudió la anatomía de los elefantes tanto vivos como fósiles, y demostró que formas fósiles como los mamuts y mastodontes eran anatómicamente diferentes de los elefantes actuales, y que se trataba, por tanto, de especies extinguidas. (Era muy improbable que pudieran existir y pasar desapercibidas.)

Según Cuvier, la Tierra había pasado por una serie de edades, cada una de las cuales había terminado con una «revolución» que había destruido la flora y fauna existentes. No creía, sin embargo, que las pruebas fósiles apoyaran la evolución. Las ideas fundamentales de Cuvier, sin embargo, no han dejado de ganar adeptos, y hoy las pruebas apuntan a al menos cinco extinciones masivas en el pasado, entre ellas la que acabó con los dinosaurios. A diferencia de Cuvier, los científicos actuales saben que la vida no vuelve a crearse a partir de la nada tras una catástrofe, sino que, tras una extinción masiva que afecta a muchas especies, las restantes evolucionan y se multiplican –a veces relativamente pronto– para llenar los nichos ecológicos vacantes, como hicieron los mamíferos tras la era de los dinosaurios. ■



Cuvier acuñó el nombre *mastodonte* («diente pezón», en griego) en referencia a la forma de pezón (o de mama) de los dientes del animal, diferentes de los de cualquier especie de elefantes actuales.

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ Antiguas glaciaciones 198–199 ▪ Extinciones masivas 218–223



NI VESTIGIO DE UN PRINCIPIO, NI PERSPECTIVA DE UN FINAL

UNIFORMISMO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
James Hutton (1726–1797)

ANTES
1778 Según el conde de Buffon, naturalista francés, la Tierra tiene al menos 75 000 años de edad, mucho más de lo que entonces se creía.

1787 El geólogo alemán Abraham Werner propone que las capas rocosas de la Tierra formaban un gran océano que cubría todo el planeta. A sus seguidores se les llamó neptunistas.

DESPUÉS
1802 La teoría uniformista de James Hutton llega a un público más amplio, al publicar el geólogo escocés John Playfair *Illustrations of the Huttonian theory of the Earth*.

1830–1833 El geólogo escocés Charles Lyell respalda y desarrolla las ideas uniformistas de James Hutton en *Principles of geology*.

El uniformismo es la teoría según la cual procesos geológicos como la sedimentación, la erosión y la actividad volcánica se dan hoy al mismo ritmo que en el pasado. La idea surgió a finales del siglo XVIII, cuando la minería, la extracción de roca y los viajes más frecuentes sacaron a luz numerosos rasgos geológicos, como estratos rocosos inusuales y fósiles hasta entonces desconocidos, cuyos orígenes fueron muy debatidos.

La opinión general de que la Tierra tenía una edad de solo unos miles de años fue desafiada por el conde de Buffon, y, en 1785, también el geólogo escocés James Hutton defendió una antigüedad de la Tierra mucho mayor. Hutton desarrolló sus ideas examinando estratos de roca en Escocia. Creía que la corteza terrestre cambiaba constantemente, por lo general muy despacio, y no veía razón para suponer que la acción geológica compleja de sedimentación, erosión y levantamiento tuviera lugar más rápido en el pasado remoto que hoy. Hutton comprendía también que la mayoría de los procesos geológicos son tan graduales que los rasgos que estaba descubriendo eran de una antigüedad astronómica.



[…] a partir de lo que de hecho ha sido, tenemos datos para concluir lo que ha de ocurrir después.
James Hutton

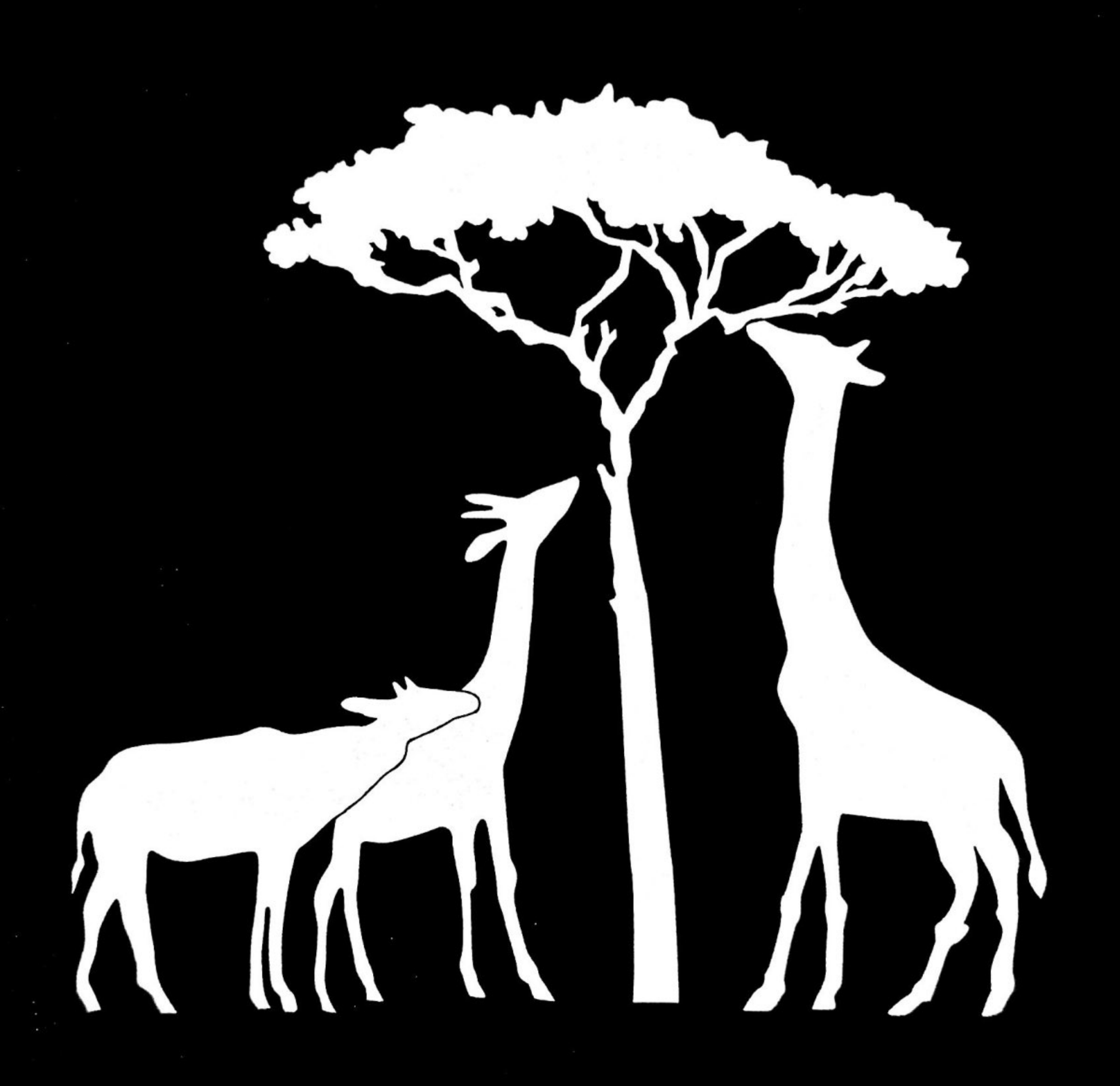


El uniformismo no logró aceptación general de inmediato, sobre todo porque negaba la interpretación literal de las versiones sobre la creación del Antiguo Testamento, pero una nueva generación de geólogos, entre ellos John Playfair y Charles Lyell, respaldaron con su peso intelectual las ideas de Hutton, que inspiraron también al joven Charles Darwin. ■

Véase también: Primeras teorías de la evolución 20–21 ▪ Evolución por selección natural 24–31 ▪ Continentes móviles y evolución 212–213

LA LUCHA POR LA EXISTENCIA

EVOLUCIÓN POR SELECCIÓN NATURAL



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Charles Darwin (1809–1882)

ANTES
1788 En Francia, el conde de Buffon completa su *Histoire naturelle*, en 36 volúmenes, que incluye ideas tempranas sobre la evolución.

1809 Jean-Baptiste Lamarck propone que los seres vivos evolucionan heredando caracteres adquiridos.

DESPUÉS
1869 El médico suizo Friedrich Miescher descubre el ADN, sin que se comprenda aún su función genética.

1900 Se redescubren las leyes de la herencia basadas en los experimentos de Gregor Mendel con guisantes a mediados del siglo XIX.

1942 El biólogo Julian Huxley acuña la expresión «síntesis moderna» para los mecanismos responsables de la evolución.

La selección natural, concepto desarrollado por el naturalista británico Charles Darwin y explicado en su libro *El origen de las especies* (1859), es el mecanismo fundamental de la evolución de los seres vivos, y da como resultado distintas tasas de supervivencia y distintas probabilidades de reproducirse. Los organismos con mayor éxito reproductivo transmiten sus genes a un número mayor de descendientes en la generación siguiente, y los individuos con tales rasgos se vuelven más numerosos en la población.



Cada día y cada hora, en todo el mundo, la selección natural examina las más leves variaciones.
Charles Darwin

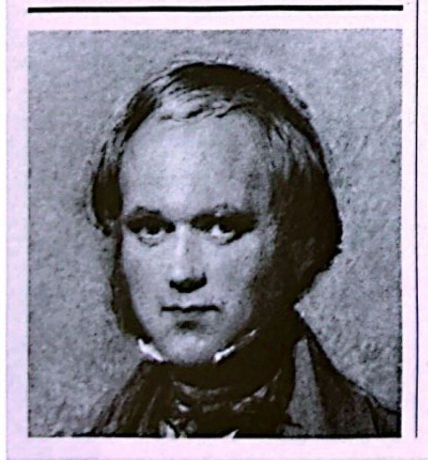


A las Galápagos

Charles Darwin comenzó a considerar la evolución durante la expedición científica pionera del *Beagle* alrededor del mundo, de 1831 a 1836. El joven Darwin aceptaba la interpretación ortodoxa de la Biblia, según la cual el mundo tenía solo unos miles de años de edad. A bordo del *Beagle*, sin embargo, Darwin leyó la obra *Principios de geología*, publicada poco antes por el geólogo escocés Charles Lyell, donde este mostraba cómo las rocas revelan cambios pequeños, graduales y acumulativos a lo largo de periodos vastos de tiempo: millones de años, no miles. Al observar por todo el mundo paisajes afectados por procesos de erosión, sedimentación y vulcanismo, Darwin comenzó a especular sobre la variación en especies animales a lo largo de periodos muy largos de tiempo, y en los motivos de tales cambios. Darwin examinó fósiles y observó animales vivos, e identificó patrones, notando, por ejemplo, que las especies extintas eran sustituidas con frecuencia por otras modernas similares, pero claramente diferentes.

El trabajo de campo de Darwin en el otoño de 1835 en el archipié-

Charles Darwin



A Darwin, nacido en Shropshire (Reino Unido) en 1809, le fascinó la historia natural desde muy joven. En la Universidad de Cambridge hizo amistad con varios naturalistas influyentes, como John Stevens Henslow, y gracias a esto fue invitado a unirse a la expedición del *Beagle* alrededor del mundo. Henslow también ayudó a Darwin a catalogar y publicitar sus hallazgos.

Las investigaciones de Darwin le reportaron reconocimiento: fue galardonado con la medalla de la Royal Society en 1853, y en 1854 ingresó en la Linnean Society. En 1859, su obra *El origen de las especies* se agotó de inmediato. Pese a una mala salud constante, Darwin fue padre de diez hijos, y nunca dejó de estudiar y desarrollar nuevas teorías. Murió en 1882.

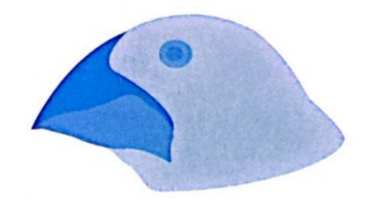
Obras principales

1839 *Zoología del viaje del Beagle.*
1859 *El origen de las especies.*
1868 *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación.*
1872 *La expresión de las emociones en el hombre y en los animales.*

Véase también: Primeras teorías de la evolución 20–21 ▪ Las reglas de la herencia 32–33 ▪ La función del ADN 34–37 ▪ El gen egoísta 38–39 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ Extinciones masivas 218–223 ▪ Análisis de viabilidad de poblaciones 312–315

lago de las Galápagos, próximo a la costa pacífica de América del Sur, aportó pruebas particularmente sólidas para su posterior teoría de la evolución por selección natural. Darwin observó que la forma del caparazón de las tortugas variaba ligeramente de una a otra isla. También le intrigó encontrar cuatro variedades de ruiseñor, en general semejantes, pero claramente diferenciadas, y que en ninguna isla hubiera más de una especie. Vio también aves pequeñas semejantes entre sí, pero con una gama variada de tamaños y formas del pico. Darwin dedujo que todas compartían un antepasado común, pero habían desarrollado rasgos diversos en ambientes distintos.

Comparación de los picos de los pinzones de las Galápagos



Geospiza magnirostris
El pico corto y afilado del pinzón terrestre grande, el mayor de los de Darwin, le permite abrir frutos secos.



Geospiza fortis
El pico variable del pinzón terrestre mediano evoluciona rápidamente en función de las semillas disponibles.



Geospiza parvula
El pinzón pequeño de árbol, de pico rechoncho, come semillas, frutos e insectos que busca entre el follaje.



Certhidea olivacea
El pico fino del pinzón cantor (o de Darwin) oliváceo le es útil para atrapar insectos y arañas pequeños.

Las conclusiones de Darwin

Cuando regresó a Inglaterra, los picos diversos de las aves pequeñas –tan habitual como impropiamente llamadas pinzones– que encontró en las Galápagos hicieron reflexionar a Darwin. Sabía que el pico es la herramienta fundamental de las aves para alimentarse, y que, por lo tanto, da pistas acerca de la dieta. Estudios posteriores revelaron que hay catorce especies distintas de pinzones en las Galápagos. Las diferencias entre sus picos son marcadas y significativas. Los pinzones de cactus, por ejemplo, tienen el pico largo y en punta, ideal para extraer semillas de los frutos de cactus; los pinzones terrestres lo tienen más corto y robusto, más útil para comer semillas grandes del suelo. El pinzón cantor gris *(Certhidea fusca)* tiene un pico esbelto y afilado, ideal para atrapar insectos voladores.

Darwin especuló que los pinzones descendían de un pinzón ancestral común llegado al archipiélago desde América del Sur, y concluyó que habían evolucionado distintas poblaciones en los diversos hábitats de las Galápagos, adaptándose cada grupo a una dieta más o menos especializada por el proceso que luego llamaría «selección natural». Con el tiempo, las distintas poblaciones se convirtieron en especies diferenciadas.

A principios del siglo XXI, investigadores de la Universidad de Harvard descubrieron nuevas pruebas de cómo ocurre esto a nivel genético. Sus descubrimientos, publicados en 2006, mostraban que una molécula llamada calmodulina regula los genes encargados de dar forma al pico de las aves, y que presenta niveles superiores en los pinzones de pico largo que en los terrestres, de pico más corto.

Refinando la teoría

Darwin estaba influido por la obra de Thomas Malthus *Ensayo sobre el principio de la población* (1798), donde se predecía que el crecimiento de la población acabaría por superar la producción de alimentos. La idea encajaba con la evidencia observada por Darwin de la competencia continua entre individuos y especies por los recursos. Este aspecto competitivo formó el núcleo de la teoría de la evolución de Darwin, aún en proceso.

En 1839, Darwin había ya desarrollado la idea de la evolución por selección natural, pero no tenía prisa por publicar, pues era muy consciente de la indignación que iba a causar entre quienes lo tomarían como un ataque a la religión y la Iglesia. Darwin se vio forzado a publicar sus ideas en 1857, cuando »

comenzó a recibir correspondencia del naturalista británico Alfred Russel Wallace, que había llegado a conclusiones muy similares de forma independiente. Se organizó una presentación conjunta de los trabajos de Darwin y Wallace en una reunión de la Linnean Society de Londres en julio de 1858, titulada «Sobre la tendencia de las especies a formar variedades, y sobre la perpetuación de las variedades y las especies por selección natural».

Al año siguiente, Darwin publicó su teoría en *El origen de las especies*. Ofendió a algunos científicos por apartarse de las ideas de Lamarck sobre transmutación, y también a los creacionistas, para los que minaba la verdad literal de la Biblia. Otros consideraron que la teoría de Darwin no explicaba la enorme gama de características de las especies, y la calificaron de «no guiada» y «no progresiva».

Darwin se sentía confiado, pues sabía que todos los individuos de una especie mostraban algún grado de variación natural. Algunos tienen bigotes más largos, o patas más cortas, o colores más vivos, por ejemplo. Como los miembros de todas las especies compiten por unos recursos limitados, dedujo que aquellos cuyos rasgos eran más favorables en su medio tienen mayores posibilidades de sobrevivir y reproducirse. Darwin sostenía también que las características que favorecían el éxito en la supervivencia y la reproducción pasarían a una parte mayor de la descendencia, mientras que los que suponían una desventaja se perderían. Darwin llamó selección natural a este proceso que permitía a las especies adaptarse mejor y prosperar en su medio.



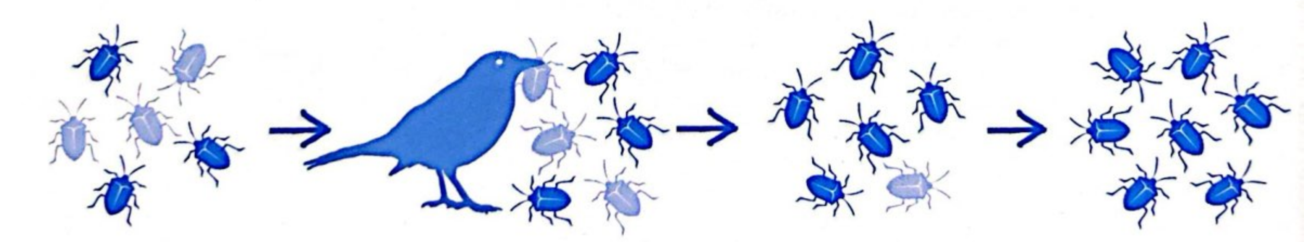
No veo ningún buen motivo para que las ideas de este libro ofendan los sentimientos religiosos de nadie.
Charles Darwin



Selección sexual

Darwin desarrolló también la teoría de la selección sexual, esbozada por primera vez en *El origen de las especies*, y en la que profundizó en *El origen del hombre y la selección en relación al sexo* (1871). Se trataba de una teoría distinta a la de la selección natural, pues Darwin era consciente de que los animales escogían pareja en función de características que no favorecen necesariamente la supervivencia. Por ejemplo, al considerar las espectaculares pero engorrosas colas de los machos de pavo real, no podía imaginar qué ventaja podían suponer para la supervivencia de su dueño, y concluyó que su fin era reforzar las posibilidades de éxito reproductivo. Las hembras escogen a los machos con colas de colores más vistosos, y el material genético de los machos escogidos pasa a la generación siguiente. Las plumas de colores vivos en la cola son señal de buena salud, por lo que escoger machos que las tengan es una buena estrategia para las hembras. La idea de Darwin de que las hembras escogían pareja fue objeto de ataques, sin embargo. La sociedad del siglo XIX podía aceptar que los machos competían por reproducirse (selección intrasexual), pero la selección intersexual, en la que uno de los sexos (la hembra por lo general) es la que escoge, fue ridiculizada.

Selección natural

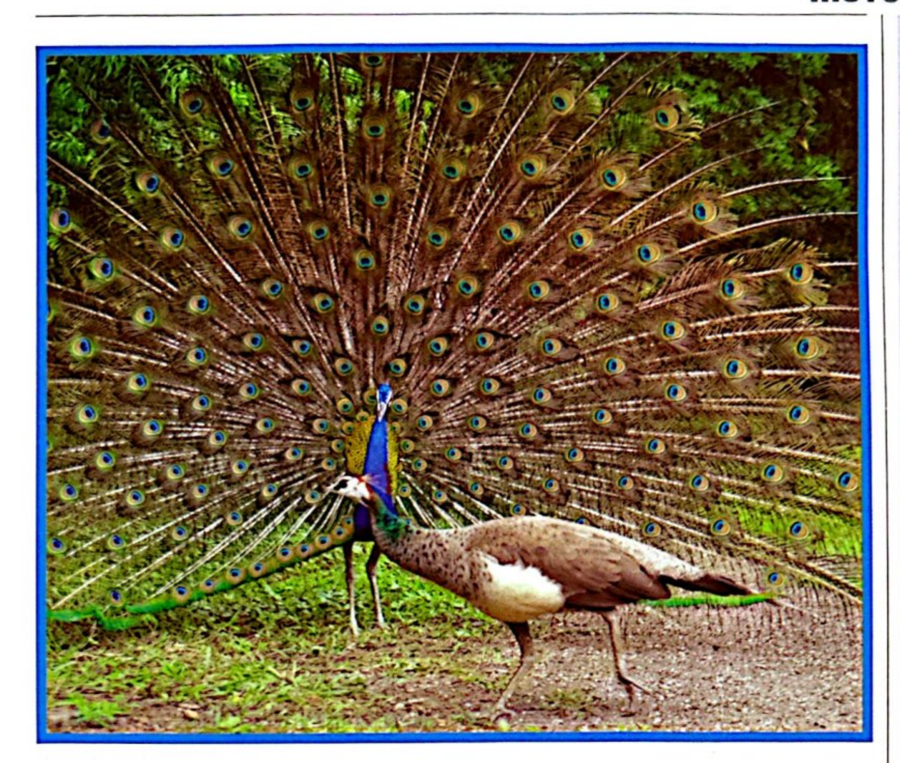


Hay variación de rasgos.
Hay escarabajos claros y otros oscuros, por ejemplo.

Hay reproducción diferencial.
Ningún medio soporta un aumento ilimitado de la población, y algunos individuos son eliminados. Las aves comen escarabajos claros, y menos de estos se reproducen.

Hay herencia.
Los escarabajos oscuros tienen más descendencia oscura, al ser un rasgo de base genética.

Resultado final.
Si la oscuridad confiere ventaja, con el tiempo todos los escarabajos serán oscuros.



El pavo real de cola más espléndida atraerá al mayor número de hembras. Sus descendientes machos la heredarán, y para ellos también será fácil aparearse.

Está claro que el éxito reproductivo es esencial para el futuro de una especie. La selección natural se describe a menudo como «supervivencia del más apto», pero la longevidad por sí sola no es de gran utilidad. Si el individuo A vive diez veces más que el individuo B, pero este produce el doble de descendencia, que también se reproducirá, B transmitirá más genes a la generación siguiente que el más longevo A.

Desarrollando la teoría

Muchas de las ideas de Darwin y Wallace han demostrado ser extraordinariamente acertadas, pese a que no se comprendía aún cómo funcionaba la genética. Aunque el propio Darwin había empleado el término «genético» –como adjetivo para describir el mecanismo aún desconocido de la herencia–, fue el biólogo británico William Bateson, a principios del siglo XX, el primero en utilizarlo en una descripción del proceso científico. En 1930, el genetista británico Ronald Fisher escribió *The genetical theory of natural selection*, que combinaba la teoría de la »



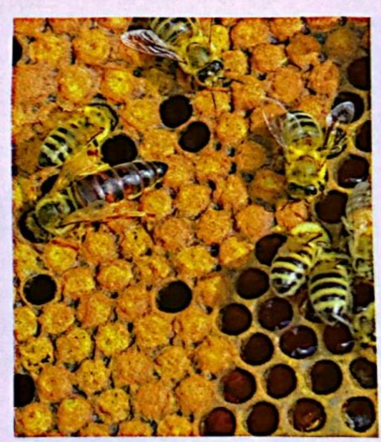
¿Por qué unos mueren y otros viven? [...], la respuesta está clara, y es que los más aptos viven.
Alfred Russel Wallace




Selección de parentesco

La expresión *«kin selection»* (selección de parentesco) la usó por primera vez el biólogo británico John Maynard Smith en 1964, y es la estrategia evolutiva que favorece el éxito reproductivo de los parientes de un organismo por encima de la supervivencia y reproducción del propio individuo.

Se da cuando un organismo se sacrifica para beneficiar a sus parientes. Darwin fue el primero en tratar el concepto, al escribir sobre la aparente paradoja que representan los insectos sociales altruistas y estériles, como las abejas obreras, que dejan la reproducción a la madre. El biólogo evolutivo británico William Donald Hamilton propuso que las abejas se comportan de modo altruista –asistiendo a otras abejas en la reproducción– cuando la proximidad genética de dos abejas y el beneficio para la receptora compensan el coste del altruismo para la donante. Esta es la regla de Hamilton.



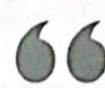
En las colonias de abejas melíferas, las obreras cuidan de la reina. Construyen la colmena, reúnen néctar y polen y alimentan a las larvas, pero no se reproducen.

El albinismo, como en este geco leopardo, es una mutación que causa la falta de pigmento. Reduce las probabilidades de supervivencia, al hacer al geco de color más claro y más sensible a la luz.

selección natural de Darwin con las ideas sobe la herencia desarrolladas por Gregor Mendel en el siglo XIX. En 1937, el genetista ucraniano-estadounidense Theodosius Dobzhansky defendió que unas mutaciones genéticas regulares son suficientes para producir la diversidad genética –y, por lo tanto, los rasgos diversos– que hacen posible la selección natural. Dobzhansky escribió que la evolución era un cambio en la frecuencia de un alelo del acervo génico, siendo un alelo una de las formas alternativas de un gen surgidas por mutación.

Una mutación es una alteración permanente en la secuencia del ácido desoxirribonucleico (ADN), la molécula que constituye un gen en un individuo, con el resultado de una secuencia que difiere de la de los demás miembros de la especie. Las mutaciones pueden darse debido a errores en la copia del ADN durante la división celular, o bien por factores ambientales, como el daño causado por la radiación solar ultravioleta. Algunas mutaciones afectan solo al organismo portador; otras, a toda la descendencia, así como a las generaciones futuras.

Las mutaciones heredadas pueden alterar o no el fenotipo del individuo, es decir, sus rasgos físicos y su conducta. Cuando afectan al fenotipo, pueden suponer una ventaja o una desventaja, favoreciendo o impidiendo la capacidad del organismo para sobrevivir y reproducirse con éxito. Las mutaciones perjudiciales tienden a desaparecer de la población, mientras que las que suponen una mejor adaptación al medio se vuelven más comunes a lo largo de las generaciones. Con el paso del tiempo, pueden producir suficiente divergencia de la población original para que evolucione una nueva especie, en el proceso conocido como especiación.



La mayoría de las grandes mutaciones son dañinas; las pequeñas son mucho más frecuentes, y resultan más a menudo útiles.
Ronald Fisher



Distintas tasas de evolución

Los antepasados de toda forma de vida en la Tierra fueron organismos muy simples. Los últimos estudios apuntan a una edad de casi 4000 millones de años para las rocas biogénicas –formadas por la actividad de seres vivos– más antiguas. Desde entonces han evolucionado formas de vida muy complejas, y los fósiles posteriores de especies más semejantes a las actuales revelan qué ocurrió. Para los antepasados del caballo, por ejemplo, el registro fósil se remonta a 60 millones de años atrás. Los primeros eran ani-



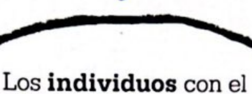
Considerada a la luz de la evolución, la biología es quizá la más satisfactoria e inspiradora de las ciencias.
Theodosius Dobzhansky



males del tamaño de un perro mediano que vivían en bosques, y tenían varios dedos en cada pata. La evolución produjo caballos mucho mayores y con un solo casco en cada pata, una adaptación a la vida en las praderas, donde dependían de la velocidad para huir de los depredadores.

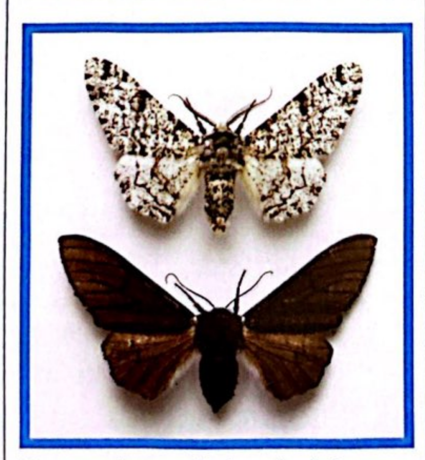
Las mariposas de los abedules *(Biston betularia)* cambiaron en un periodo más corto. Es una especie de color claro por lo general, para poder camuflarse sobre la corteza de abedul; sin embargo, hay una mutación que produce mariposas negras. Antes del siglo XIX, la mayoría eran de color claro. Durante la revolución industrial (1760–1840), el hollín ennegreció los árboles y edificios de las ciudades británicas, y la variante negra se volvió predominante. En 1895, el 95 % de las mariposas eran negras, ya que las aves comían muchas más de color claro, por estar desprovistas de camuflaje. Este fenómeno continúa sirviendo en la actualidad como ejemplo de la aún vigente teoría de Darwin, ya que, desde el momento en que descendió la concentración de hollín en las ciudades británicas, han vuelto a proliferar las mariposas de color claro. ■

Los individuos de una especie presentan **formas diversas** de un **rasgo**.



Los **individuos** con el rasgo mejor **adaptado** a su **ambiente** gozan de ventaja para **sobrevivir** y **reproducirse**.

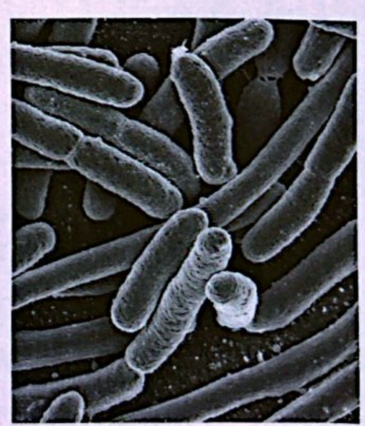
Estos rasgos se transmiten a la generación siguiente.



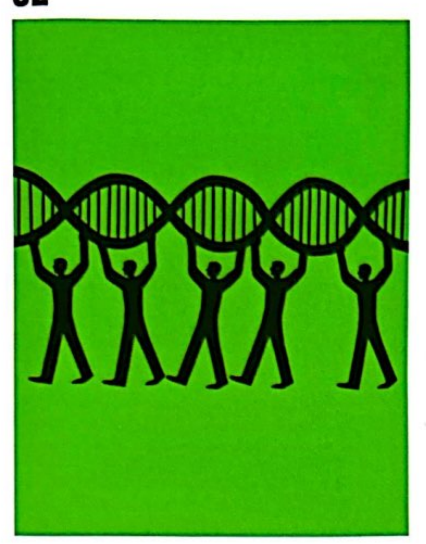
Dos mariposas de los abedules muestran la evolución en acción. La de abajo, ejemplo de melanismo industrial, apareció en las ciudades industriales de Reino Unido a inicios del siglo XIX.

Evolución en tiempo real

Richard Lenski, catedrático de la Universidad Estatal de Míchigan, inició el experimento a largo plazo de la evolución de la bacteria *E. coli* en 1988, y durante más de 25 años estudió 59 000 generaciones de la misma. En ese tiempo, observó que la especie iba utilizando la solución de glucosa en la que vivía de manera más eficiente, y que ganaba en tamaño y crecía más rápido. Además, evolucionó una nueva especie capaz de utilizar el citrato, un compuesto de la solución que no podía aprovechar la bacteria original. El empleo creciente de antibióticos acaba con muchas bacterias causantes de enfermedades, pero no con las que han adquirido mutaciones que las vuelven resistentes a los fármacos. Al matar las bacterias sin defensas, las cepas resistentes se vuelven predominantes, se multiplican y transmiten sus mutaciones a las generaciones futuras. Es la selección natural en acción.



Escherichia (E.) coli causa infecciones graves del intestino, y otras cada vez más difíciles de tratar a medida que se multiplican cepas resistentes a los fármacos.



LOS HUMANOS SON SOLO PORTADORES DE GENES

LAS REGLAS DE LA HERENCIA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gregor Mendel (1822–1884)

ANTES
1802 El biólogo francés Jean-Baptiste Lamarck afirma que los caracteres adquiridos en vida por los seres vivos se transmiten a la descendencia.

1859 Charles Darwin explica su teoría de la evolución y la selección natural en su libro *El origen de las especies.*

DESPUÉS
1869 El químico suizo Friedrich Miescher identifica el ADN, al que llama «nucleína».

1953 El británico Francis Crick y el estadounidense James Watson, junto con otros biólogos moleculares, hallan la estructura del ADN.

Década de 2000
Investigadores del campo de la epigenética describen la herencia por mecanismos diferentes a la secuencia del ADN.

Mucho antes de que los científicos consiguieran descifrar el código genético, en 1866, el monje austriaco Gregor Mendel fue el primero en mostrar cómo se transmiten los rasgos de una generación a otra. Tras un estudio tan largo como minucioso, Mendel logró predecir con exactitud las leyes de la herencia.

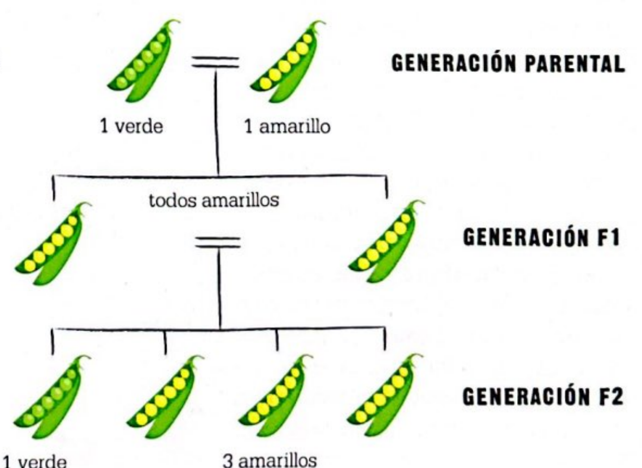
Cuando Mendel comenzó su experimento, los científicos suponían que los diversos rasgos de las plantas y los animales se transmitían en un proceso de mezcla. Durante su trabajo en el jardín del monasterio, Mendel observó que no era así: cuando cruzaba una planta que producía siempre guisantes verdes con otra que los producía siempre amarillos, el resultado no eran guisantes verdes amarillentos, sino guisantes amarillos.

Los trabajos de Mendel

Mendel, en el curso de su investigación (1856–1863), cultivó unas treinta mil plantas de guisantes a lo largo de varias generaciones, y mantuvo un registro minucioso de los resulta-

Los guisantes de Mendel

El experimento de Mendel con guisantes demostró que el gen de la coloración amarilla era dominante, mientras que el de la verde era recesivo.



Véase también: Primeras teorías de la evolución 20–21 ▪ Evolución por selección natural 24–31 ▪ La función del ADN 34–37 ▪ El gen egoísta 38–39



La herencia se encarga de modificar su propia maquinaria.
James Mark Baldwin
Psicólogo estadounidense




dos. Se centró en rasgos (fenotipos) que tenían únicamente dos formas claras, por ejemplo, flores blancas o flores moradas. La polinización cruzada de plantas de uno y otro tipo permitió a Mendel examinar el rasgo del color amarillo o verde de los guisantes. Mendel llamó generación F1 a los guisantes resultantes del cruce, todos ellos amarillos. A continuación cruzó las plantas de la generación F1 entre sí para producir la generación F2, en la que algunos guisantes eran amarillos, y otros, verdes. La generación F1 mostraba un solo rasgo, el color amarillo, al que Mendel llamó «dominante». En la generación F2, sin embargo, el 75% tenía el rasgo dominante amarillo, y el 25%, el verde, no dominante, o «recesivo».

Leyes de la herencia

Mendel teorizó que cada planta tenía dos factores controlando cada rasgo. Al cruzarlas, la descendencia hereda un factor de cada planta. Los factores pueden ser dominantes o recesivos. Cuando ambos son dominantes, la planta resultante exhibirá el rasgo dominante, y, con dos factores recesivos, presentará el rasgo recesivo. Cuando hay un factor dominante y otro recesivo, sin embargo, la planta exhibirá el rasgo dominante.

Genetista pionero

Gregor Mendel publicó su trabajo en 1866; sin embargo, pasó inadvertido hasta 1900, cuando los botánicos Hugo de Vries, Carl Erich Correns y Erich Tschermak von Seysenegg lo redescubrieron, y los científicos demostraron las teorías de Mendel con mayor repercusión.

En solo diez años, los científicos llamaron genes a los pares de factores, y mostraron su vínculo con los cromosomas. En la actualidad se sabe que la herencia es mucho más compleja de lo que apreció Mendel, pero su estudio meticuloso continúa constituyendo la base de los estudios actuales. ■



Los guisantes aportaron los datos que usó Mendel para las teorías que explicaban la transmisión de rasgos de una a otra generación.



Gregor Johann Mendel

Nacido Johann Mendel en 1822, en una granja de Silesia –en lo que era entonces parte del Imperio austriaco, y en la actualidad es parte de la República Checa–, Mendel estudió filosofía y física en la Universidad de Olomouc entre 1840 y 1843. En esa época se interesó por la obra de Johann Karl Nestler, que estudiaba los rasgos hereditarios en las plantas y los animales. En 1847, Mendel ingresó en un monasterio, donde recibió el nombre Gregor, y, entre 1851 y 1853, amplió sus estudios en la Universidad de Viena.

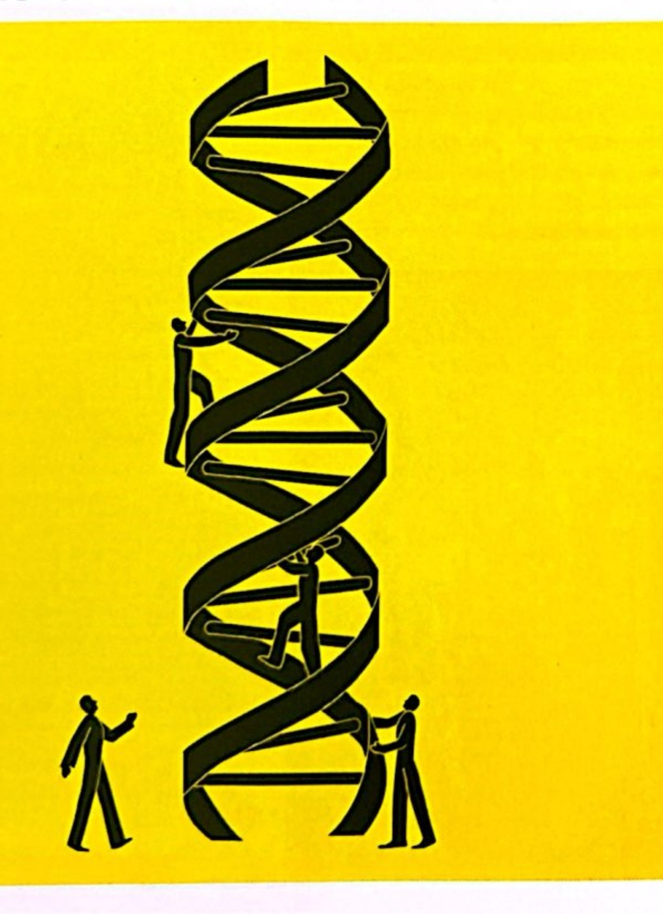
Al volver al monasterio en 1853, el abad Cyril Napp dio permiso a Mendel para usar los jardines para sus estudios sobre hibridación. El propio Mendel se convirtió en abad en 1868, y ya no tuvo tiempo para experimentar. No recibió crédito por sus hallazgos en vida, pero se le considera el fundador de la genética moderna.

Obras principales

1866 *Experimentos sobre híbridos en las plantas (Versuche über Pflanzenhybriden).*

HEMOS DESCUBIERTO EL SECRETO DE LA VIDA

LA FUNCIÓN DEL ADN



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Francis Crick (1916–2004), **Rosalind Franklin** (1920–1958), **James Watson** (n. 1928), **Maurice Wilkins** (1916–2004)

ANTES
1910–1929 El bioquímico de EE UU Phoebus Levene describe los componentes químicos del ADN.

1944 Oswald Avery, Colin Macleod y Maclyn McCarty, científicos de EE UU, demuestran que el ADN determina la herencia.

DESPUÉS
1990 El equipo británico del embriólogo Ian Wilmut clona un mamífero adulto: la oveja Dolly.

2003 Se completa el mapa del genoma humano.

El descubrimiento de la estructura del ADN (ácido desoxirribonucleico) en 1953 es uno de las avances científicos más importantes de la historia. Fue clave para comprender los fundamentos que constituyen la vida, y explicó cómo se almacena y transmite la información genética. El inglés Francis Crick y el estadounidense James Watson celebraron su descubrimiento conjunto de forma discreta en un pub de Cambridge, y a la celebración le siguió la publicación del trabajo en la revista *Nature*. Su descubrimiento, que potencialmente impulsaba los avances científicos, tenía un impacto importante en muchos campos de investigación, desde la medicina a la ciencia forense, la taxonomía y la agricultura. Las ramificaciones de su trabajo llegan hasta

Véase también: Primeras teorías de la evolución 20–21 ▪ Evolución por selección natural 24–31 ▪ Las reglas de la herencia 32–33 ▪ El gen egoísta 38–39 ▪ Un sistema para identificar todos los seres vivos 86–87 ▪ El concepto biológico de especie 88–89



Los biólogos moleculares James Watson (izda.) y Francis Crick (dcha.) en 1953, ante su maqueta de la doble hélice del ADN. Watson lo llamó «la molécula más interesante de la naturaleza».

hoy, con el avance de los métodos para manipular material y los nuevos conocimientos sobre cómo funcionan los genes individuales.

El logro de Crick y Watson fue la culminación de décadas de investigación por numerosos científicos, entre ellos Rosalind Franklin y Maurice Wilkins. Mientras Crick y Watson trabajaban con modelos 3D para averiguar cómo encajaban los componentes del ADN, en el King's College de Londres, Franklin y Wilkins desarrollaban métodos para radiografiar el ADN y ver su estructura. Watson había visto ejemplos del trabajo de Franklin en los que había indicios de la forma helicoidal antes de que él y Crick anunciaran su descubrimiento.

En 1962, Crick, Watson y Wilkins recibieron el Nobel de Fisiología o Medicina. Franklin murió en 1958, y en vida no se le reconoció su parte en el descubrimiento, aunque Crick y Watson reconocieran abiertamente que su trabajo había sido esencial.

Estructura de doble hélice

El ADN es una molécula compuesta por dos filamentos largos y delgados que se enrollan uno alrededor del otro como una escalera retorcida, en una forma conocida como doble hélice. Los lados de la escalera están hechos de desoxirribosa (un monosacárido) y fosfato, mientras que los peldaños consisten en pares de bases nitrogenadas, adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). A se empareja siempre con T para formar el par de bases AT, y G siempre con C para formar el par de bases GC.



El ADN es como un programa informático, pero mucho más avanzado que ningún *software* conocido.
Bill Gates



El ADN es el plano arquitectónico de la vida. Las secuencias de bases a lo largo del filamento constituyen los genes que aportan la información que determina la forma y fisiología completas de un ser vivo. Un triplete de bases se conoce como codón, y cada codón especifica la producción de uno entre veinte aminoácidos. El orden en el que se unen los aminoácidos en una cadena a »

Ingeniería genética

Comprender la estructura del ADN ha permitido a los científicos modificar el material genético de las células: la «ingeniería» genética. Es posible recortar un gen de un organismo (el donante) y colocarlo en el ADN de otro. Cuando esto se intentó por vez primera en la década de 1970, era un proceso complejo y largo, pero lo han simplificado y acelerado avances tecnológicos tales como las repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas (CRISPR, por sus siglas en inglés), que han resultado particularmente útiles. En teoría, hoy en día, los genetistas pueden unir cualquier gen a cualquier otro. Se han probado combinaciones chocantes, como la inserción del gen para producir seda de araña en ADN de cabra para que las cabras den leche rica en proteínas. Con genes modificados también se producen hormonas y vacunas.

En terapia genética se usa un vector genéticamente modificado (a menudo un virus) para llevar un gen al ADN de un organismo y reemplazar otro defectuoso, o no deseado.



Análisis científico de una muestra de ADN. La manipulación genética es un recurso médico estándar, y la huella genética, una herramienta forense vital.

Alimentos modificados genéticamente

La ingeniería genética se puede aplicar a los cultivos agrícolas para su mejora. Los cultivos así alterados se llaman organismos genéticamente modificados. Las empresas que operan en el sector pueden modificar el ADN de una planta para que produzca más de un cierto nutriente, o una toxina específica para una plaga concreta. También se puede alterar el ADN de una planta para que sea resistente a un herbicida, y que este mate solo malas hierbas y no lo cultivado.

Algunos ecólogos afirman que hay riesgo de que las plantas sin modificar resulten contaminadas por las plantas modificadas, y que los efectos a largo plazo de consumirlas no se conocen bien aún. Otro motivo de temor es que, en un futuro, las grandes empresas agroquímicas controlen el suministro alimentario mundial patentando los cultivos que producen, perjudicando así a los países más pobres.



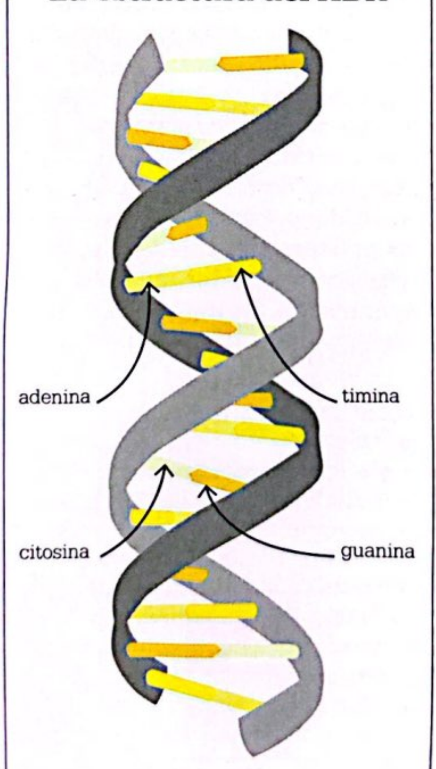
Se están desarrollando nuevos tipos de arroz por modificación genética. Esto puede aumentar su valor nutricional y su resistencia a las enfermedades.

lo largo del ADN determina el tipo de proteína que fabrican. Por ejemplo, la combinación GGA es el codón de la glicina. Hay 64 tripletes posibles a partir de los cuatro pares de bases, y 61 de ellos codifican para un aminoácido particular. Los otros tres sirven como señales de inicio y parada que controlan la lectura de la información por la maquinaria celular. El ADN se organiza también en cromosomas separados, de los que hay 23 pares en una célula humana.

Copiar el código

Cuando las células se dividen, el ADN tiene que copiarse, para lo cual se parten los pares de bases, cortando la escalera por la mitad en dos filamentos únicos, que, combinando los pares de bases correctos, sirven de modelo para producir un segundo filamento complementario en cada uno. El resultado del proceso son dos filamentos de ADN enteros, copias exactas del original.

La estructura del ADN



Una molécula de ADN consiste en una doble hélice formada por dos filamentos de monosacáridos y fosfatos, unidos por pares de bases de nucleótidos: adenina y timina, o citosina y guanina.

Como el ADN permanece en el núcleo de la célula, una molécula emparentada, llamada ácido ribonucleico mensajero (ARNm), copia segmentos de secuencia de codificación del ADN y lleva la información a las regiones de la célula donde se fabrican proteínas nuevas. El ARN está químicamente emparentado con el ADN, aunque, en lugar de la base timina (T), tiene uracilo (U), menos estable, pero cuya elaboración requiere menos energía. Los organismos vivos estables se benefician de tener genomas de ADN, pero el ARN constituye el genoma de algunos virus, para los que la estabilidad es menos ventajosa.

El ADN se encuentra en todos los seres vivos de la Tierra, desde las amebas hasta los insectos, los árboles, los tigres y los seres humanos. La secuencia de pares de bases varía, desde luego, y la diferencia permite a los genetistas establecer la relación entre distintas especies.

Errores buenos y malos

El ADN es una molécula muy estable, pero en ocasiones se producen errores, llamados mutaciones. Estas pueden deberse a error, duplicación u omisión en el orden de los nucleótidos A, C, G y T. La mutación puede ser espontánea, como resultado de errores al copiarse el ADN, o inducida por factores externos, como la exposición a la radiación o a sustancias cancerígenas. Algunas mutaciones no tienen efecto, pero otras pueden cambiar lo que produce un gen o inhibir su funcionamiento, causando problemas al conjunto del organismo. Son ejemplos de trastor-



La anemia de células falciformes se transmite cuando ambos padres tienen el gen defectuoso que hace mutar los glóbulos rojos. Puede ser doloroso, y aumenta el riesgo de infecciones graves.

nos causados por mutación de genes la fibrosis quística y la anemia de células falciformes.

Aunque muchas mutaciones sean dañinas, a veces una mutación confiere una ventaja al individuo, permitiéndole sobrevivir en su ambiente mejor que otros de la misma especie. Este tipo de mutación puede ser transmitido por el proceso de selección natural. A lo largo de muchas generaciones, la mutación supone un mecanismo de diversificación, supervivencia del más apto y, en último término, de evolución.

El genoma humano

El 14 de abril de 2003 se completó la larga tarea de cartografiar (secuenciar) el genoma humano entero. Los genetistas averiguaron la posición exacta de todos los pares de bases en una cadena de unos 3000 millones de nucleótidos que contenían unos 30 000 genes individuales. Esto permitió a los genetistas identificar nuevos genes y el papel que desempeñan en los organismos.

Armado con este conocimiento, un individuo puede saber si ha heredado un gen defectuoso. Además, con acceso a tales datos se pueden examinar embriones en busca de trastornos genéticos conocidos antes de implantarlos en el útero. En marzo de 2018 se había secuenciado el ADN de unos 15 000 organismos. Esta información aclara el linaje evolutivo de los animales, y el modo en que se han diversificado.

El hallazgo de la composición y estructura del ADN ha revolucionado la ciencia de la herencia, pero no hay que olvidar que las regiones de ADN usadas para codificar proteínas suponen solo el 2 % del genoma humano. La naturaleza del 98 % restante no es plenamente comprendida aún por los genetistas, aunque se cree que al menos algunas de estas regiones afectan a la regulación del modo en que se expresan o activan los genes. Parece que a los futuros genetistas les esperan muchos nuevos descubrimientos. ■

Código de barras del ADN

La idea del código de barras del ADN surgió en 2003, cuando un equipo de la Universidad de Guelph, en Canadá, propuso que sería posible identificar especies analizando una sección de su ADN. El equipo, dirigido por Paul Hebert, escogió una región del gen llamado citocromo c oxidasa 1 constituida por 648 pares de bases. Esta región se analiza rápidamente, pero la secuencia es lo bastante larga también como para diferenciar una especie de otra y un individuo de otro de la misma especie. Se pueden utilizar distintos segmentos para otras formas de vida. La primera parte del sistema consiste en catalogar muestras de especies conocidas. Se extrae el ADN y se organiza en una secuencia de pares de bases (secuenciación). La secuencia se guarda en una base de datos; así, cuando se secuencia una muestra de ADN de una especie desconocida, el ordenador coteja la muestra con los datos almacenados. La técnica del código de barras ha resultado muy útil para la clasificación de animales y plantas.



Con la ingeniería genética, seremos capaces de [...] mejorar la raza humana.
Stephen Hawking





LOS GENES SON MOLECULAS EGOISTAS

EL GEN EGOÍSTA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Richard Dawkins (n. 1941)

ANTES
1963 William Donald Hamilton, biólogo británico, presenta el tema de los «intereses egoístas» del gen en *The evolution of altruistic behaviour.*

1966 En su obra *Adaptation and natural selection*, el biólogo estadounidense George C. Williams propone que el altruismo resulta de la selección al nivel del gen.

DESPUÉS
1982 Richard Dawkins defiende, en *El fenotipo extendido*, que el estudio de un organismo debe incluir el análisis del modo en que sus genes afectan al medio.

2002 Stephen Jay Gould critica la teoría de Darwin en *La estructura de la teoría de la evolución*, obra que revisa y refina las ideas del darwinismo clásico.

El concepto del «gen egoísta», popularizado por el biólogo evolutivo británico Richard Dawkins en su obra de 1976 del mismo nombre, sostiene que la evolución se basa fundamentalmente en la supervivencia de formas distintas de un gen particular a expensas de otras. Aquellas formas que sobreviven son las que adquieren rasgos físicos y conductuales (fenotípicos) que promueven con éxito su propia propagación. Los defensores de la teoría argumentan que, como la información heredable pasa de generación en generación por medio del material genético del ADN, la perspectiva de los genes es la más adecuada, tanto para la selección natural como para la evolución.

La selección natural favorece la supervivencia del gen, no la del individuo.





El macho de la araña viuda negra se aparea aunque la **hembra lo devore a continuación**.

Los animales que **advierten a otros** de la presencia de depredadores **se sacrifican por el bien del grupo**.

Las abejas no reproductoras contribuyen a la **supervivencia de la colonia**.

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Las reglas de la herencia 32–33 ▪ La función del ADN 34–37 ▪ Mutualismos 56–59



El macho se acerca cautelosamente a una gran viuda negra para aparearse. Es un acto dictado por los genes, y transmitirlos le costará la vida al macho.

Dawkins se vio muy influido por la obra de William Donald Hamilton sobre la naturaleza del altruismo, y examinó atentamente la biología del egoísmo y el altruismo en *El gen egoísta*. Dawkins afirmaba que los organismos son meros vehículos para mantener los genes, o «replicadores». Los genes que ayudan a un organismo a sobrevivir y reproducirse tienden a mejorar también las propias posibilidades de replicarse de dichos genes.

Los genes con éxito aportan a menudo un beneficio a su portador. Por ejemplo, un gen que protege a un animal o planta de una enfermedad contribuye a su propia difusión. En ocasiones, sin embargo, los intereses del replicador y el vehículo pueden parecer en conflicto. Los genes impulsan al macho de la araña viuda negra a aparearse, pese al peligro de que ella lo devore. El sacrificio del macho, sin embargo, nutre a la hembra, y también mejora las posibilidades de transmitir sus genes.

Egoísmo y altruismo

El egoísmo de los genes suele dar lugar al egoísmo en la conducta de un organismo individual, pero hay circunstancias en las que el gen puede lograr sus fines egoístas favoreciendo un aparente altruismo en el organismo. Un ejemplo es la selección de parentesco, la estrategia evolutiva que favorece el éxito reproductivo de los parientes de un organismo, incluso al precio de la propia reproducción o supervivencia de este.

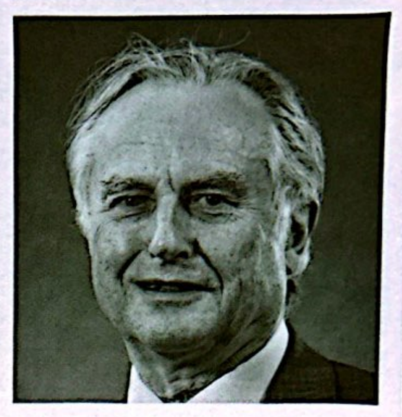
Un ejemplo extremo de altruismo de base genética es la eusocialidad. Las abejas melíferas, una especie eusocial, viven en colonias de individuos reproductores y no reproductores. Ayudando a la colonia a sobrevivir, los muchos miles de obreras no reproductoras garantizan la reproducción de los genes que comparten con la única reproductora, la reina.

Para los críticos de la teoría de Dawkins, no se puede afirmar que los genes individuales actúen de forma egoísta, pues no controlan la conducta. Dawkins respondió que no había sido su intención sugerir que los genes tienen voluntad o consciencia, y, más tarde, escribió que quizá «el gen inmortal» habría sido un título mejor tanto para su concepto como para su libro. ■



La teoría de la evolución viene a ser igual de dudosa que la teoría de que la Tierra gira alrededor del Sol.
Richard Dawkins





Richard Dawkins

Richard Dawkins nació en Kenia, de padres británicos. Tras el regreso de su familia a Reino Unido, Dawkins se interesó mucho por el mundo natural, y estudió zoología en la Universidad de Oxford. Allí fue alumno de Niko Tinbergen, pionero de los estudios sobre conducta animal y distinguido con el premio Nobel. Después de una estancia breve en la Universidad de California en Berkeley, Dawkins volvió a Oxford como conferenciante de zoología.

A Richard Dawkins se le conoce sobre todo por su libro *El gen egoísta*, en el que defiende que el gen es la principal unidad de selección en la evolución. Su teoría desencadenó una serie de debates feroces con Stephen Jay Gould y otros biólogos evolutivos. Dawkins es también un defensor del ateísmo y el feminismo.

Obras principales

1976 *El gen egoísta*.
1982 *El fenotipo extendido*.
1986 *El relojero ciego*.
2006 *El espejismo de Dios*.
2009 *Evolución: el mayor espectáculo de la Tierra*.

PROCESOS ECOLOGICO

S
OS

Joseph Grinnell publica su estudio sobre el cuitlacoche californiano, en el que se basa la teoría de los **nichos ecológicos**.



1917

1925–1926



El modelo **Lotka-Volterra** usa una ecuación matemática para describir las interacciones entre **depredador y presa**.

El estudio de **Robert MacArthur** sobre aves reinitas de América del Norte muestra cómo distintas especies pueden **evitar la competencia directa** para coexistir.



1957

1961

Joseph Connell muestra que **prosperan** balanos diferentes **en las distintas zonas de marea**, aunque en teoría podrían vivir en cualquiera.

Dan Janzen observa la interdependencia de las acacias y sus hormigas residentes, y concluye que ambas especies coevolucionaron de modo **mutualista**.



1965

1969

Robert Paine acuña el término **«especie clave»** para especies con un papel vital en el funcionamiento del ecosistema.

En el siglo v a.C., el historiador griego Heródoto describió la costumbre de los cocodrilos de abrir las fauces para que los chorlitos limpiaran los restos de comida de sus dientes. Pudo ser el primero en escribir sobre un proceso ecológico, en este caso, una relación mutualista entre reptiles y aves. Aristóteles y Teofrasto observaron muchas otras interacciones entre animales y su medio en el siglo iv a.C.

A lo largo de los dos milenios siguientes se llevaron a cabo otras incontables observaciones del mundo natural; sin embargo, la incapacidad de observar seres muy pequeños, nocturnos o acuáticos impedía una comprensión cabal de cómo unos organismos interactúan con otros y con su entorno. Además, pocos interesados en la naturaleza tenían ocasión de conocer nada muy alejado de su patria chica. Con el avance de la tecnología y las mayores facilidades para viajar, científicos como Robert Hooke, Antonie van Leeuwenhoek, Carlos Linneo, Alexander von Humboldt, Alfred Russel Wallace, Charles Darwin y Johannes Warming fueron cada vez más conscientes de los procesos ecológicos, y pusieron los cimientos de la ecología, aunque no emplearan ese término.

Modelos matemáticos

Uno de los procesos ecológicos más básicos es la lucha por la supervivencia: para los herbívoros, encontrar alimento; para los carnívoros, presas; y para las presas, evitar ser devoradas. Los depredadores hacen lo posible por cazar y comer presas, y estas, lo posible para evitar ser cazadas. En 1910, Alfred Lotka introdujo uno de los primeros modelos matemáticos aplicados a la ecología. Actualmente conocido como modelo Lotka-Volterra, sus ecuaciones predador-presa ayudan a predecir fluctuaciones de la población de ambos.

A principios del siglo xx, Joseph Grinnell investigó ampliamente las necesidades de hábitat en el oeste de EE UU. Observó que distintas especies ocupaban diferentes nichos de un hábitat, y que si dos especies tienen necesidades alimentarias muy semejantes, una expulsará a la otra. Darwin había observado esto durante el viaje del *Beagle*, pero el axioma de Grinnell y estudios posteriores desarrollaron la idea. En 1934, Gueorgui Gause mostró lo que llamó el principio de exclusión competitiva en proyectos de laboratorio. En palabras de William E. Odum, en 1959,

Roy Anderson y **Robert May** muestran cómo afectan las **epidemias** a la tasa de crecimiento en poblaciones animales.



Década de 1970

1972

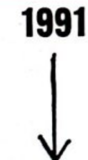
Knut Schmidt-Nielsen publica *Cómo funcionan los animales*, obra muy influyente en la ecofisiología.

Los estudios publicados por **Ronald Pulliam**, **Eric Charnov** y **Graham Pyke** desarrollan la **teoría del forrajeo óptimo**, según la cual los animales reúnen recursos con el mínimo gasto de energía posible.



1977

1991



Earl Werner publica sus hallazgos sobre los **efectos no consuntivos** de los depredadores sobre sus presas.

Robert Sterner y **James Elser** inician el estudio de la **estequiometría ecológica**, o los cambios en la tasa de los componentes químicos de los seres vivos según los recursos.



2002

«el nicho ecológico de un organismo depende no solo de dónde vive, sino también de lo que hace».

Del campo al laboratorio

Los experimentos en el laboratorio y las observaciones de campo son las principales fuentes de datos para el estudio de los procesos ecológicos, pero no hubo experimentos de campo –en los que se manipula un entorno local para probar una hipótesis– realizados con rigor científico hasta el trabajo de Joe Connell con balanos en Escocia. Sus experimentos –cuyos resultados se publicaron en 1961– fueron meticulosamente planeados y observados, y eran repetibles.

Connell estableció la referencia para el trabajo de campo, pero los experimentos en laboratorio continúan siendo vitales, tal como demostraría Earl Werner 30 años más tarde. Su trabajo mostró el impacto no consuntivo de las larvas de libélula sobre sus presas, los renacuajos.

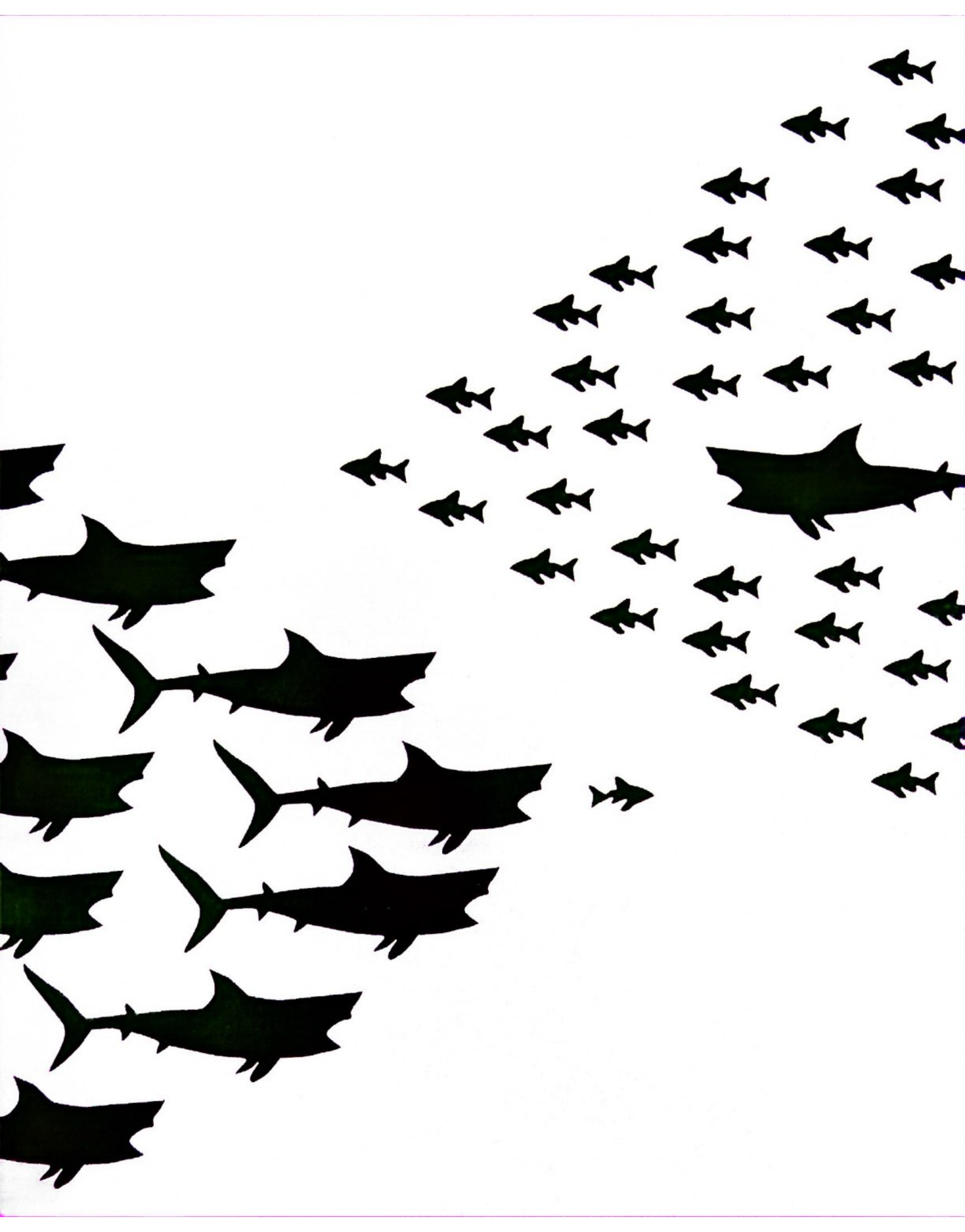
Desde mediados del siglo XX han surgido muchas nuevas ideas sobre los procesos ecológicos. El trabajo de Robert MacArthur y otros sobre la competencia entre especies llevó al desarrollo de la teoría del forrajeo óptimo, que trata de explicar por qué los animales escogen ciertos alimentos y no otros. Las relaciones mutualistas se comprendieron mejor gracias a los estudios de biólogos como Daniel Janzen. El trabajo llevado a cabo por Robert Paine con estrellas de mar y mejillones dio relieve al concepto de las especies clave, aquellas que tienen una influencia desproporcionada en sus ecosistemas.

Nueva tecnología

Avances tecnológicos como las técnicas sofisticadas para la toma de muestras químicas, los satélites con equipo de teledetección y los ordenadores capaces de procesar rápidamente una gran cantidad de datos han abierto nuevos ámbitos de estudio. La estequiometría ecológica, por ejemplo, estudia el flujo de energía y elementos químicos por las redes alimentarias y ecosistemas desde el nivel molecular al macroscópico. Como tantas ideas ecológicas, sus orígenes se remontan a muchos años atrás, pero solo arraigaron gracias a la obra de Robert Sterner y James Elser *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*, de 2003. Nuevas técnicas como esta ayudarán a profundizar en el conocimiento de los procesos de la ecología. ■

LECCIONES DE LA TEORIA MATEMATICA SOBRE LA LUCHA POR LA VIDA

ECUACIONES PREDADOR-PRESA



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Alfred J. Lotka (1880–1949), **Vito Volterra** (1860–1940)

ANTES
1798 El economista británico Thomas Malthus muestra cómo la tasa de cambio de una población aumenta a medida que esta crece.

1871 En la novela de Lewis Carroll *Alicia a través del espejo*, la Reina Roja dice a Alicia que «es preciso correr mucho para permanecer en el mismo lugar».

DESPUÉS
1973 Leigh Van Valen, biólogo estadounidense, postula el efecto Reina Roja, que describe una «carrera armamentística» natural constante.

1989 Las ecuaciones Arditi-Ginzburg ofrecen otro modelo de dinámica predador-presa, al incluir el impacto de la tasa de predadores y presas.

Las poblaciones de **dos especies**, una **predadora** y otra **presa**, interactúan.

La presa tiene **acceso al alimento**, y su **población crece exponencialmente**.

Los **predadores devoran** las **presas** que encuentran.

Comer presas da lugar a **más predadores**.

Más predadores dan por resultado menos presas, y el número de predadores se reduce.

Las ecuaciones predador-presa son un ejemplo temprano de aplicación de las matemáticas a la biología. Formuladas en la década de 1920 por el matemático estadounidense Alfred J. Lotka y el matemático y físico italiano Vito Volterra, las dos ecuaciones –también conocidas como ecuaciones Lotka-Volterra– describen el modo en que fluctúa la población de una especie depredadora y la de su presa, una en relación con la otra.

Lotka propuso las ecuaciones en 1910, como manera de comprender las tasas de reacciones químicas autocatalíticas, o procesos químicos autorregulados. En la década siguiente, Lotka aplicó las ecuaciones a la dinámica de población de los animales salvajes.

En 1926, Vito Volterra llegó a las mismas conclusiones. Se interesó por el tema tras conocer al biólogo marino italiano Umberto D'Ancona. D'Ancona comentó a Volterra que el porcentaje de peces depredadores atrapados en las redes del Adriático había aumentado mucho desde la Primera Guerra Mundial. El cambio estaba claramente vinculado a la reducción drástica de la pesca durante la guerra, pero D'Ancona no

Vito Volterra



Nacido en 1860 en Ancona (Italia), hijo de un vendedor de telas judío, Vito Volterra se crió en la pobreza, pese a lo cual llegó a ser profesor de mecánica en la Universidad de Pisa en 1883, con solo 23 años de edad, y emprendió una carrera como matemático. Ocupó nuevos puestos docentes en las universidades de Turín y Roma. En 1900 se casó, y fue padre de seis hijos, aunque solo cuatro sobrevivieron hasta la edad adulta. Fue senador del Reino de Italia en 1905, y trabajó en el desarrollo de dirigibles militares durante la Primera Guerra Mundial. En 1931 fue expulsado de la Universidad de Roma por negarse a jurar lealtad al dictador Benito Mussolini. Se vio forzado a trabajar en el extranjero, y solo regresó brevemente a Italia antes de su muerte, en 1940.

Obras principales

1926 «Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically», *Nature*.
1935 *Les associations biologiques au point de vue mathématique.*

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ El gen egoísta 38–39 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Mutualismos 56–59 ▪ Especies clave 60–65 ▪ Teoría del forrajeo óptimo 66–67

Un guepardo persigue a una gacela de Thomson. Las ecuaciones predador-presa predicen cómo cambiarán las poblaciones de ambas especies en respuesta a la actividad de la otra.

podía explicar por qué menos pesca no se traducía en más peces de todo tipo en las redes. Aplicando las mismas ecuaciones que Lotka, Volterra pudo explicar las fluctuaciones tanto de los depredadores como de las presas.

Principios de población

Cuando Lotka y Volterra realizaron sus cálculos, la ciencia de la dinámica de poblaciones estaba en su infancia, y apenas había progresado desde los estudios de población del economista británico Thomas Malthus, a finales del siglo XVIII. Según afirma la teoría de Malthus, una población crece rápidamente mientras se mantengan constantes los medios de subsistencia, y la tasa de cambio de la población aumenta cuanto más crece la población. A partir de esta teoría, Malthus predijo un futuro catastrófico para la humanidad, dado que la población crecía mucho más rápido que la cantidad de alimento que serían capaces de producir las tierras de labranza del mundo. Con el tiempo, se llegaría inevitablemente a un punto en el que la población sucumbiría al hambre global.

Gracias a los avances tecnológicos en la agricultura y al desarrollo de abonos artificiales, la desoladora predicción de Malthus no se cumplió, pero su modelo de población resultó útil aplicado a las poblaciones de especies en los ecosistemas. Todos los hábitats, así como el nicho que ocupa una especie en su comunidad de organismos, tienen una capacidad de carga, esto es, un máximo poblacional que se puede mantener con los recursos disponibles, tales como agua, espacio, alimento y luz. Todo aumento de población más allá de este límite se verá reducido por factores naturales, y, en consecuencia, las poblaciones salvajes deberían ser más o menos estáticas, fluctuando alrededor de la capacidad de carga, si se ignora el impacto azaroso de posibles acontecimientos catastróficos.

Dicho equilibrio relativo, sin embargo, no siempre se correspondía »



La especie predatoria no puede, por tanto, exterminar a la presa bajo las condiciones a las que nuestras ecuaciones se refieren.
Alfred J. Lotka





La matemática sin historia natural es estéril, pero la historia natural sin matemática resulta confusa.
John Maynard Smith
Matemático y evolucionista británico



con lo observado, como en el caso del aumento repentino de la población de peces depredadores relatado por D'Ancona. Una teoría para explicar la discrepancia se basaba en la premisa de que la población de los depredadores guarda relación con el tamaño de la población de las presas, su fuente de alimento. Cuando abunde el alimento disponible, habrá una población mayor de depredadores, y el aumento de esta dará como resultado una reducción en el número de las presas, lo cual a su vez acabará reduciendo el número de los depredadores. El tamaño de ambas poblaciones crecerá y decrecerá, pero la proporción de depredadores y presas se mantendrá estable.

Esta teoría del equilibrio también era desmentida por las observaciones. Con su modelo matemático, Volterra pudo mostrar cómo el tamaño relativo de las poblaciones de depredadores y presas sí oscila, pero la tasa a la que cada población crece o decrece está siempre variando, y casi nunca se corresponde directamente con los cambios experimentados por la otra población. A fin de eliminar variables, Volterra planteó una serie de supuestos: primero, que las especies depredadora y presa no tienen límites reproductivos, y que la tasa de cambio de una población es proporcional a su tamaño; segundo, que la población de las presas –herbívoros, se presume– es siempre capaz de encontrar alimento suficiente que permita su supervivencia. Además, supuso que la población de las presas es la única fuente de alimento de los depredadores, y que estos nunca se sacian ni dejan de cazar. Por último, se descarta el impacto de condiciones ambientales tales como el clima o los desastres naturales, y no se tiene en cuenta el efecto de la diversidad genética de depredadores y presas sobre su capacidad de supervivencia.

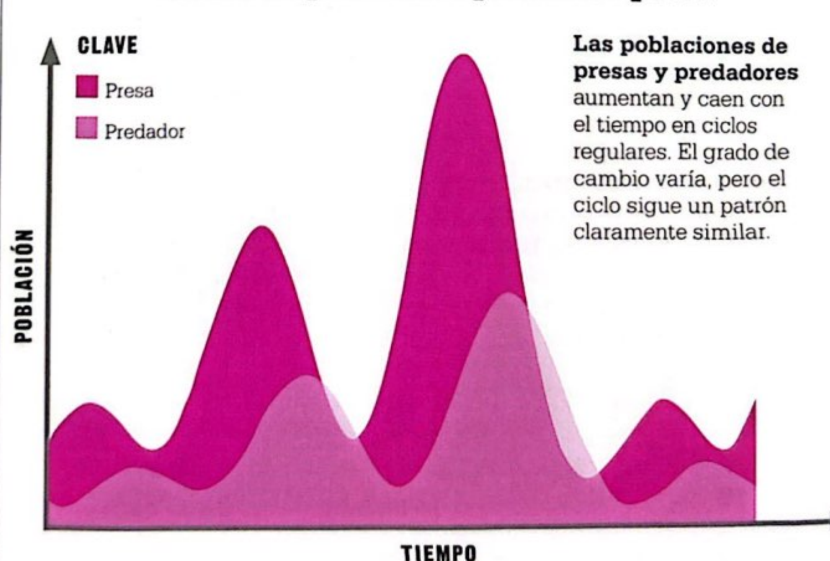
Planteada en un gráfico, la población de depredadores va por detrás de los ascensos y caídas de la de las presas, y continúa subiendo cuando esta empieza a declinar. Esto explicaba la mayor proporción de depredadores observada por D'Ancona después de que la reducción de la pesca permitiera una mayor abundancia de presas.

Las fluctuaciones relativas de las poblaciones dependen de las tasas reproductivas relativas de las dos especies y de la tasa de depredación. Por ejemplo, las oscilaciones en el tamaño de una población de hormigas y una de osos hormigueros casi no se notan, por tener tasas reproductivas tan diferentes. Las oscilaciones entre poblaciones con tasas reproductivas similares, como el lince ibérico y el conejo, son mucho más pronunciadas.

Carrera armamentística

Las ecuaciones predador-presa revelaron que las especies están trabadas en una lucha sin fin que pasa del desastre y casi la extinción a tiempos de abundancia y fertilidad. En esta carrera armamentística biológica, la presión evolutiva sobre las presas consiste en escapar de la depredación y sobrevivir, para así tener más descendencia. Para el depredador, la presión consiste en cazar más para poder alimentar a una descendencia mayor. Ninguna especie es superior, sin embargo, sino que una responde a las adaptaciones de la otra.

Ciclos de población predador-presa



Las poblaciones de presas y predadores aumentan y caen con el tiempo en ciclos regulares. El grado de cambio varía, pero el ciclo sigue un patrón claramente similar.

La relación de depredador y presa entre artiodáctilos, como los ciervos y antílopes, y mamíferos carnívoros, como los grandes felinos y lobos, es un ejemplo de esta carrera armamentística evolutiva. Los artiodáctilos tienen patas largas, extendidas por apoyarse en la punta misma de unos huesos de las extremidades engrosados y fusionados. Esta adaptación les permite correr y saltar más que sus depredadores. La respuesta de los grandes felinos, como los tigres y los leones, fue desarrollar velocidad y fuerza para abatir presas veloces en ataques por sorpresa. Los lobos desarrollaron la resistencia para correr distancias largas sin necesidad de parar, lo cual les permite perseguir en equipo a sus presas y matarlas cuando están agotadas.

Aunque las ecuaciones predador-presa ayudan a comprender la dinámica de poblaciones de dos especies, los supuestos de los que dependen rara vez se reflejan en la vida real. Algunos depredadores se especializan en una sola presa, pero otros factores del ecosistema afectan a sus poblaciones.

Otras aplicaciones

Las ecuaciones Lotka-Volterra han servido para estudiar la dinámica de las cadenas y redes tróficas en las que una especie puede ser depredadora de otra, pero también presa de una tercera, así como para examinar la relación entre especies huésped y parásitas, de algún modo semejante a la que hay entre depredador y presa. Los parásitos a menudo se especializan en una sola especie huésped, en una relación que debería parecerse a la descrita por las ecuaciones Lotka-Volterra, pero, en la práctica, parece que el proceso de la evolución interfiere: un parásito no suele matar a su huésped (los que lo hacen se llaman parasitoides), pero puede perjudicar su salud. La teoría evolutiva de la Reina Roja, propuesta en la década de 1970 por Leigh Van Valen, describe cómo, gracias a genes beneficiosos, determinados individuos de una población huésped pueden mantenerse sanos pese al ataque de los parásitos. Estos evolucionan constantemente para explotar a estos individuos aparentemente inmunes, y, por tanto, los genes beneficiosos de la población huésped también cambian. Así, y aunque parezca que todo permanece igual, en la batalla constante entre huésped y parásito, la evolución nunca se detiene. ■

La avispa parasitoide pone huevos en los áfidos (los insectos amarillos menores de la imagen). Se le llama así porque las larvas se comerán luego a los áfidos al crecer.

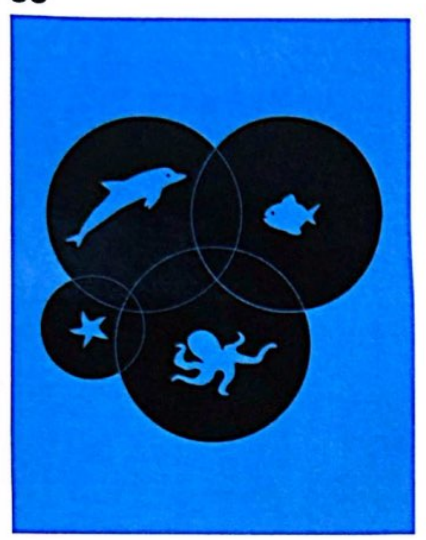


Volterra buscaba una teoría matemática de la supervivencia del más apto.

Alexander Weinstein

Matemático ruso-estadounidense





UN HILO FRAGIL DE CIRCUNSTANCIAS DETERMINA LA EXISTENCIA DE CADA ESPECIE

NICHOS ECOLÓGICOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Joseph Grinnell (1877–1939)

ANTES
1910 En un trabajo sobre escarabajos, el biólogo estadounidense Roswell Hill Johnson es el primero en usar la palabra «nicho» en un contexto biológico.

DESPUÉS
1927 Charles Elton, ecólogo británico, subraya en *Animal ecology* la importancia del papel de un organismo además de su «dirección», en su definición de nicho ecológico.

1957 En un trabajo académico titulado «Concluding remarks», el ecólogo británico George Evelyn Hutchinson expande la teoría de los nichos al medio entero de un organismo.

1968 Un estudio del australiano D. R. Klein sobre la introducción, auge y desaparición del reno en la isla de San Mateo (Alaska) identifica el nicho destructivo.

El nicho de un organismo es una combinación del lugar que ocupa y el papel que ejerce en el medio, e incluye el modo en el que satisface sus necesidades de alimento y refugio, y también cómo evita a los depredadores, compite con otras especies y se reproduce. Todas sus interacciones con otros organismos y el medio forman también parte del nicho. Un nicho único es una ventaja para todo animal o planta, ya que reduce la competencia con otras especies. Para los ecólogos, es vital un conocimiento pleno del nicho de un organismo para conformar intervenciones que compensen los cambios ambientales causados por la destrucción de hábitats y el cambio climático.

El pionero del concepto de nicho fue Joseph Grinnell, biólogo estadounidense que estudió un ave llamada cuitlacoche californiano. En 1917 publicó sus observaciones, en las que mostraba cómo se alimentaba y reproducía en un medio de matorral, el chaparral, y cómo esca-

En la **competencia constante** por el **alimento** y los **recursos**, las especies mejor adaptadas superan a las menos adaptadas al medio.

→

Reduciendo la competencia es más probable sobrevivir.

↓

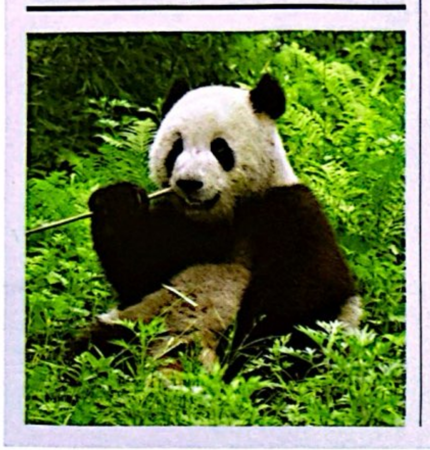
Hallar un **nicho único** es la circunstancia que **elimina la competencia**.

←

La existencia de cada especie está determinada por un hilo frágil de circunstancias.

Véase también: El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Experimentos de campo 54–55 ▪ Teoría del forrajeo óptimo 66–67 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Construcción de nichos 188–189

Un ultraespecialista



El panda gigante ocupa un nicho ecológico muy especializado, y su dieta consiste principalmente en bambú, un alimento pobre en proteínas y rico en celulosa. Los pandas digieren una proporción escasa de lo que ingieren, lo cual les obliga a comer mucho bambú –tanto como 12,5 kg diarios– y a buscar comida durante hasta 14 horas diarias. No está claro cómo los pandas han llegado a depender tanto del bambú, pero algunos zoólogos suponen que es una fuente de alimento abundante y fiable, y los pandas no son depredadores hábiles.

Los pandas comen partes distintas de la planta, según sea la estación. A finales de la primavera, prefieren los primeros brotes verdes. En otros momentos del año comen hojas, y tallos en invierno, cuando poco más hay disponible. En los pandas han evolucionado unos maxilares potentes y un falso pulgar para manipular los tallos de bambú. Su tracto digestivo no es eficiente para procesar grandes cantidades de materia vegetal, pues es similar al de sus antepasados carnívoros, pero la fauna bacteriana del intestino facilita la digestión.

paba de sus depredadores corriendo entre la vegetación. El camuflaje del cuitlacoche, las alas cortas y patas fuertes estaban perfectamente adaptados a la vida en su medio. Grinnell vio en el hábitat del chaparral el «nicho» del cuitlacoche. La idea permitía también la equivalencia ecológica de plantas y animales, por la cual especies de lugares y parentesco lejanos muestran adaptaciones similares, tales cómo hábitos de alimentación, en nichos semejantes. En el *outback* australiano, por ejemplo, las aves del género *Pomatostomus* se alimentan en un medio de matorral de modo similar al cuitlacoche, que no es un pariente próximo. Grinnell identificó también nichos vacantes, o hábitats que potencialmente podría ocupar una especie, pero donde no está presente.

Ampliar el nicho

En la década de 1920, el ecólogo Charles Elton miró más allá de la definición simple del nicho como hábitat. Para Elton, los factores primarios eran lo que comía el animal y por quién era comido. Treinta años más tarde, George Evelyn Hutchinson expandió la definición para que el nicho tuviera en cuenta todas las interacciones de un organismo con otros y con el medio no vivo, incluidos la geología, la acidez del suelo o el agua, los flujos de nutrientes y el clima. La obra de Hutchinson animó a otros a explicar la variedad de recursos que usa un organismo (amplitud de nicho), cómo coexisten las especies que compiten entre sí (partición de nicho), y el solapamiento de recursos por distintos animales y plantas (solapamiento de nicho).



[Un nicho] es un hiperespacio multidimensional muy abstracto.

George Evelyn Hutchinson



La importancia del hábitat

Los nichos ecológicos dependen de la existencia de un hábitat estable, pues un cambio pequeño puede erradicar los nichos ocupados por un organismo. Así, por ejemplo, las larvas de libélula solo se desarrollan dentro de un cierto rango de acidez, composición química y temperatura del agua, y en presencia de presas determinadas y un número limitado de depredadores. Las hembras adultas necesitan la vegetación adecuada para la puesta, como las larvas para la metamorfosis. La libélula tiene también un impacto sobre su medio: los huevos son alimento para los anfibios; las larvas, que son tanto depredadoras como presas, añaden nutrientes al agua; y los adultos cazan insectos. Tales necesidades e impactos definen el nicho ecológico. Hutchinson defendía que, para que una especie persista, las condiciones deben darse dentro de determinados rangos, y que excederlos puede suponer su extinción. ■



NO PUEDEN EXISTIR COMPETIDORES TOTALES

EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN COMPETITIVA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gueorgui Gause (1910–1986)

ANTES
1925 Alfred James Lotka usa ecuaciones para analizar variaciones en poblaciones de depredadores y presas, como un año después, independientemente, el matemático Vito Volterra.

1927 Volterra amplía y actualiza su estudio de 1926 para incluir varias interacciones ecológicas dentro de una comunidad.

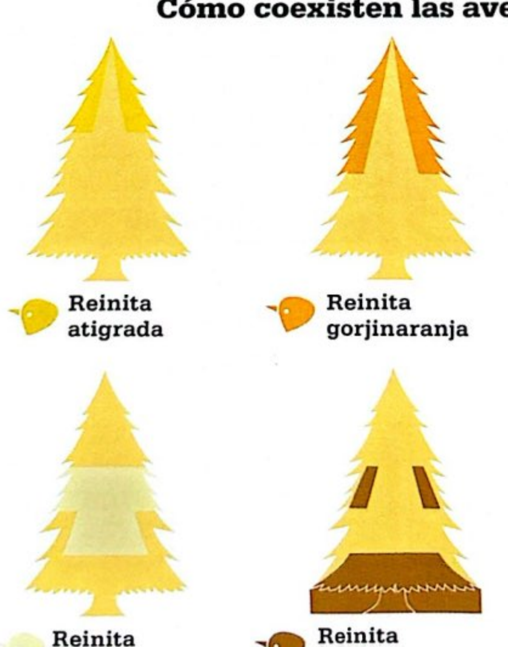
DESPUÉS
1959 George Evelyn Hutchinson amplía las ideas de Gause y describe el límite de similitud entre dos especies que compiten.

1967 Robert MacArthur y Richard Levins emplean la teoría de probabilidades y las ecuaciones Lotka-Volterra para describir la interacción de especies que coexisten.

La competencia es el motor de la evolución; la necesidad de ser más grande, fuerte y mejor trae inevitablemente adaptaciones que confieren ventajas. Cuando dos especies compiten por recursos idénticos, la que tenga alguna ventaja superará a la otra, y la más débil de las dos especies se extinguirá o se adaptará para dejar de competir. Esta proposición, el principio de exclusión competitiva, la planteó el microbiólogo ruso Gueorgui Gause, y también se llama ley de Gause.

Gause dedujo su principio a partir de experimentos de laboratorio con cultivos de microorganismos, no de observaciones en la naturaleza. Según Gause, en la naturaleza hay demasiadas variables para sacar

Cómo coexisten las aves reinitas



Cinco especies de reinita pueden compartir el mismo árbol, ya que cada una habita un nicho propio. Al vivir de este modo, evitando el solapamiento, las aves no compiten.

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ El gremio ecológico 176–177 ▪ Construcción de nichos 188–189 ▪ Especies invasoras 270–273



La ardilla roja es menor que la gris, y tiene una dieta y un hábitat más restringidos. Además, la puede matar el parapoxvirus de las ardillas, del que las grises son portadoras sin que les afecte.

conclusiones acerca del funcionamiento de los mecanismos ecológicos, y opinaba que habían sido pocos los progresos desde los tiempos de Darwin en la comprensión de la competencia de las especies por la supervivencia. Del método experimental, en cambio, habían derivado grandes avances en campos como la genética. De hecho, el principio de exclusión competitiva –aunque útil como modelo teórico– rara vez se observa en la naturaleza, por la simple razón de que, con tal de sobrevivir, un competidor en desventaja tiende a mudarse o adaptarse rápidamente.

Evitar la competencia

La mayoría de los seres vivos pueden realizar los cambios necesarios para sobrevivir. En un solo jardín pueden vivir aves diversas a lo largo de un año, por emplear todas nichos distintos. Tienen picos de formas y tamaños variados, adaptados a alimentos diferentes: los robines prefieren los insectos, y los pinzones, las semillas. También varía la elección de hábitat y de momento para alimentarse, en lo que se conoce como partición de recursos.

En 1957, Robert MacArthur observó el fenómeno entre las aves reinitas de América del Norte. Las cinco especies observadas, cada una con marcas de color distintivas, visitaban las coníferas para atrapar insectos. Podían coexistir en el mismo hábitat, ya que no intentaban alimentarse en la misma parte del árbol, sino a distintas alturas y profundidades del follaje, evitando así la competencia.



Hagamos con este fin un microcosmos artificial [...], llenemos un tubo de ensayo con un medio nutritivo y varias especies de protozoos que consumen el mismo alimento o se devoran unos a otros.

Gueorgui Gause



Un competidor invasivo

Los problemas suelen surgir cuando se introduce repentinamente una especie exótica en un ecosistema. Las ardillas rojas y grises de Gran Bretaña son un ejemplo: al llegar la gris de América en la década de 1870, ambas especies compitieron por los mismos alimentos y hábitats, lo cual puso bajo presión a la especie roja nativa. La ardilla gris tenía ventaja, por ser capaz de adaptar su dieta: puede comer las bellotas verdes, por ejemplo, que la roja solo digiere maduras. En la misma zona del bosque, las ardillas grises pueden diezmar la reserva de alimento antes de que las rojas empiecen siquiera a roer. Las grises pueden vivir también en poblaciones más densas y en hábitats más variados, por lo que han sobrevivido mejor a la destrucción de los bosques. Como resultado, la ardilla roja está al borde de la extinción en Inglaterra. ■

Tipos de competencia

El principio de exclusión competitiva cubre dos tipos principales de competencia: la intraespecífica, entre individuos de la misma especie, asegura la supervivencia de los más aptos, de manera que únicamente se reproducen los individuos más sanos, o los mejor adaptados a un entorno particular; el segundo tipo es interespecífico, cuando la competencia se da entre dos especies distintas por los mismos recursos. El más importante de dichos recursos será el recurso limitante, el que requieren ambos para reproducirse. Los ecólogos establecen otras dos distinciones: la interferencia se da cuando dos organismos luchan directamente por un recurso limitado, como una pareja o un alimento predilecto; la explotación es la competencia indirecta, como lo es agotar un recurso privando del mismo al competidor, y se observa en las plantas cuya captación de nutrientes o agua es más eficiente que la de las plantas vecinas.



LOS EXPERIMENTOS DE CAMPO MAL HECHOS SON PEOR QUE INUTILES

EXPERIMENTOS DE CAMPO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Joseph Connell (n. 1923)

ANTES
1856 Los británicos John Lawes y Joseph Gilbert inician el Experimento Park Grass en Rothamsted para probar cómo afectan al rendimiento del heno distintos abonos.

1938 Harry Hatton, ecólogo francés, realiza uno de los primeros experimentos de campo marinos, con balanos en la costa bretona.

DESPUÉS
1966 Robert Paine, ecólogo estadounidense, retira la estrella de mar *Pisaster ochraceus* de las pozas de marea de un ecosistema pacífico, y estudia el efecto de su ausencia en otras especies.

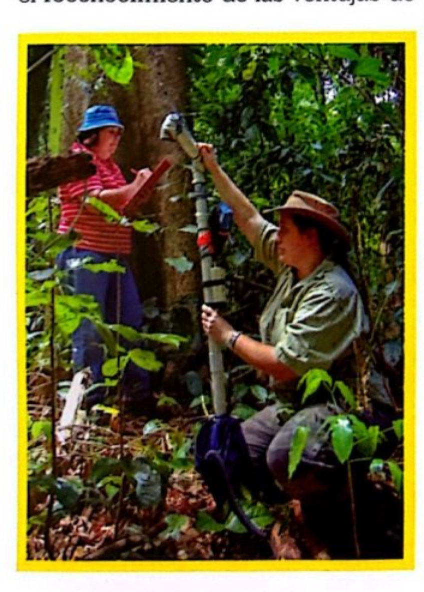
1968 Se establece en Ontario (Canadá) la Experimental Lakes Area para estudiar los efectos del enriquecimiento de nutrientes (eutrofización) en sus 58 lagos de agua dulce.

La experimentación es clave en ecología. Sin ella, lo que sabemos del porqué de la conducta de los seres vivos sería en gran medida especulativo. También es esencial la observación rigurosa; pero, muy a menudo, hay que experimentar para comprender plenamente lo observado.

Se usan tres tipos principales de experimentos ecológicos para probar teorías: modelos matemáticos, experimentos de laboratorio y experimentos de campo. Cada método tiene sus méritos, pero es reciente el reconocimiento de las ventajas de los experimentos de campo. Antes de la década de 1960, los experimentos fuera del laboratorio eran una rareza.

Sin embargo, el laboratorio es un entorno artificial en el que los organismos pueden no comportarse como en su hábitat natural. Así, los murciélagos que abandonan el refugio al anochecer pueden seguir rutas distintas para alimentarse en primavera y finales del verano. Los motivos potenciales de tal cambio –cambios en la distribución de las presas, o amenaza de depredadores; diferencias estacionales de cobertura arbórea; o interferencia humana y contaminación lumínica– no pueden determinarse en el laboratorio. Los modelos matemáticos ayudan a predecir patrones, pero serían menos eficaces para identificar las causas de un cambio. Para comprender el comportamiento de los murciélagos es vital estudiar su entorno natural, y esto solo se consigue con técnicas de campo.

Los experimentos de campo permiten manipular varios factores para probar su relevancia. En el ejemplo



Los ecosistemas de la pluvisilva son unos de los entornos más ricos en especies de la Tierra, lo cual hace de ellos lugares de gran valor para experimentos de campo ecológicos.

Véase también: Nichos ecológicos 50–51 ▪ Una visión moderna de la diversidad 90–91 ▪ Comportamiento animal 116–117 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Construcción de nichos 188–189

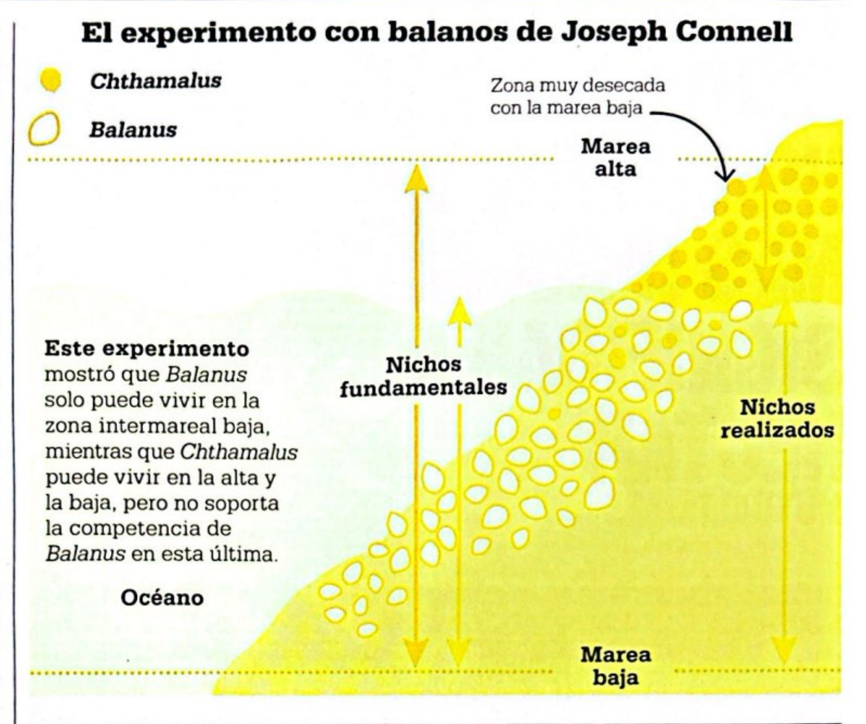
de los murciélagos, se puede apagar el alumbrado callejero para evaluar el impacto de la contaminación lumínica en su conducta.

Balanos escoceses

En 1961, el ecólogo estadounidense Joseph Connell publicó los resultados de su estudio sobre los balanos en la costa escocesa. Como las larvas de balano nadan libres y pueden asentarse en cualquier parte, Connell quiso averiguar si el hecho de que *Balanus balanoides* colonizara la parte baja de la zona intermareal, y *Chthamalus stellatus*, la parte alta, era debido a la competencia, la depredación o a factores ambientales.

Connell manipuló un entorno local, y lo observó durante más de un año. De una parte retiró los balanos *Chthamalus*. No fueron reemplazados por *Balanus*, lo cual indicaba que *Balanus* no toleraba el grado de desecación de la parte alta con marea baja. Después, Connell retiró la población de *Balanus* de la parte baja, y observó que sí era reemplazada por *Chthamalus*. Ambas especies podían vivir en la parte baja, pero solo una en la alta, lo cual indicaba que *Chthamalus* estaba mejor equipado para las duras condiciones de esta, pero no podía competir con *Balanus* en la inferior. El nicho fundamental de *Chthamalus* (donde la especie es normalmente capaz de sobrevivir) abarcaba ambas zonas, pero su nicho realizado (el área que de hecho habita) era más restringido.

El experimento con balanos de Joseph Connell





> Gracias a estos estudios [de Connell] conocemos mejor los mecanismos de la dinámica de poblaciones y comunidades, la diversidad y la demografía.
> **Stephen Schroeter**
> ***Biólogo marino***



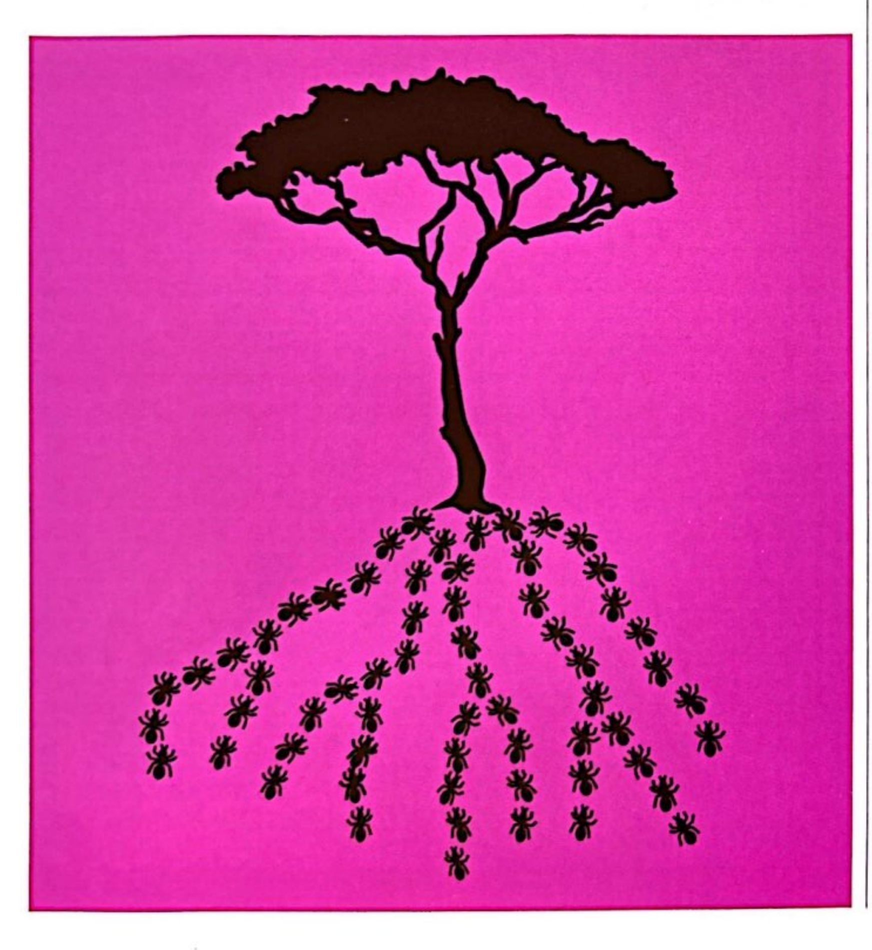
Experimentos sobre diversidad

A inicios de la década de 1970, Connell y el ecólogo estadounidense Daniel Janzen publicaron una explicación del grado de diversidad arbórea en los bosques tropicales, la llamada hipótesis Janzen-Connell. Connell cartografió árboles en dos pluvisilvas de la región australiana Queensland del Norte, y halló que el éxito de las plantas jóvenes era menor cuando su vecino más próximo era de la misma especie. Cada especie es objetivo de herbívoros y patógenos específicos, que comerán o atacarán a los individuos menores y más débiles cercanos, y esto tiende a impedir el agrupamiento de una sola especie.

En 1978, Connell propuso la hipótesis de la perturbación intermedia (HPI), según la cual, niveles tanto altos como bajos de perturbación reducen la diversidad de especies en un ecosistema, de modo que puede esperarse una gama más extensa de especies entre los dos extremos. Varios estudios avalan la hipótesis. Uno de ellos, realizado en las aguas costeras de Australia, examinó los efectos de la perturbación de las olas sobre la diversidad; y se halló una diversidad baja tanto en las zonas muy expuestas como en las muy abrigadas. ■

MAS NECTAR SIGNIFICA MAS HORMIGAS, Y MAS HORMIGAS SIGNIFICAN MAS NECTAR

MUTUALISMOS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Dan Janzen (n. 1939)

ANTES
1862 Charles Darwin atribuye la polinización de una orquídea africana de nectario largo a una polilla de probóscide igualmente larga.

1873 El zoólogo belga Pierre-Joseph van Beneden emplea por vez primera el término «mutualismo» en un contexto biológico.

1964 Primer uso del término «coevolución» por los biólogos estadounidenses Paul Ehrlich y Peter Raven al describir las relaciones mutualistas entre mariposas y las plantas de las que se alimentan.

DESPUÉS
2014 Los investigadores descubren el mutualismo inusual pero beneficioso entre perezosos, algas y polillas.

En la biología se dan varios tipos de interacción entre organismos distintos: una especie de un ecosistema puede perder en la competencia con otro por los mismos recursos; las especies presa sirven de alimento a las especies depredadoras; y se dan también relaciones simbióticas, en las que una especie se beneficia, pero no a expensas de otra, o no se beneficia, pero sobrevive. En la relación denominada mutualismo, la relación beneficia a ambas especies.

Un árbol y sus hormigas

A mediados de la década de 1960, al joven ecólogo estadounidense

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Ecología animal 106–113



Hormigas y sus larvas al abrigo de la espina hinchada de una *Acacia drepanalobium* de África oriental. A cambio de refugio, las hormigas protegen al árbol de los herbívoros.

Daniel Janzen le fascinó la asombrosa relación mutualista entre las acacias y las hormigas en el este de México. El suyo fue uno de los primeros estudios en profundidad de una interacción semejante. Los socios eran el cuernecillo, una acacia espinosa, y la hormiga de las acacias, que vive en las espinas en forma de cuerno de la acacia. Janzen vio que las hormigas reina buscan brotes desocupados, abren un agujero en una de las espinas hinchadas, ponen en ella los huevos y la abandonan de manera ocasional para alimentarse del néctar de la acacia. Las larvas nacidas de los huevos se alimentan de las puntas de las hojas, ricas en glúcidos y proteínas, hasta metamorfosearse en hormigas obreras. Con el tiempo, todas las espinas de la acacia llegan a estar habitadas, con poblaciones de hasta 30 000 hormigas por colonia.

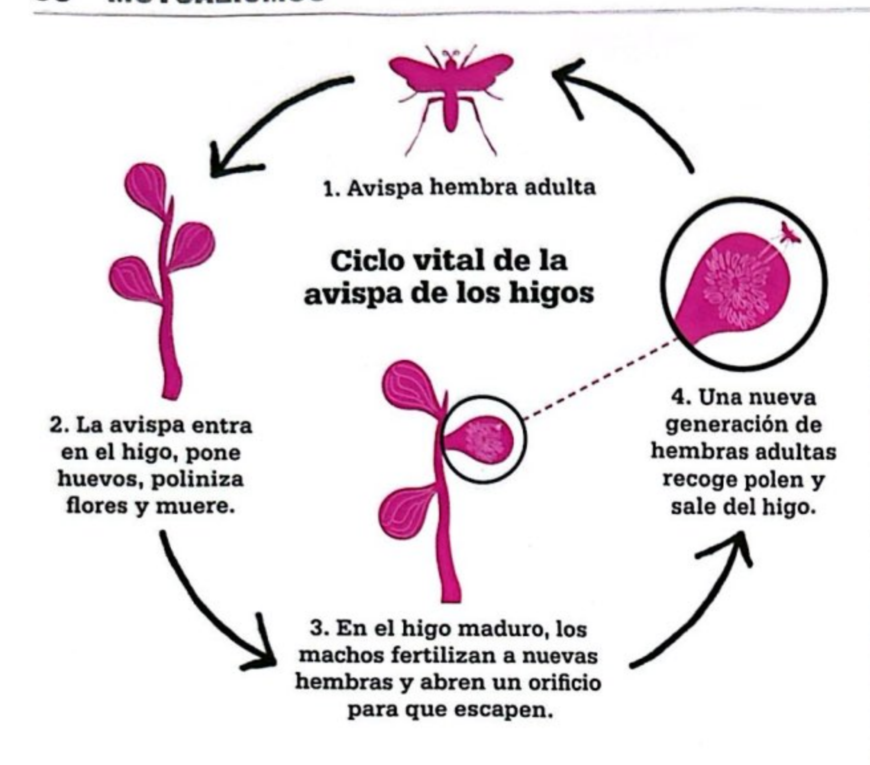
Janzen mostró que, a falta de la presencia de hormigas para defenderlas, las acacias no soportan los daños causados por los insectos que se alimentan de sus hojas, tallos, flores y raíces. Sin hormigas, una acacia perdería las hojas y moriría a los seis meses o al año. También, al no poder sostener su crecimiento, le harían sombra otros árboles. Janzen cortaba las espinas y cortaba o quemaba los brotes para eliminar a las hormigas de los árboles, y comprobó que volvían en cuanto empezaban a crecer espinas nuevas.

A cambio de refugio y alimento, las hormigas prestan dos servicios a la acacia: defienden sus hojas de otros insectos y se alimentan de los plantones de árboles cercanos potencialmente competitivos. Janzen llamó «mutualistas obligados» a las acacias y sus hormigas, »

Yucas y sus polillas

En las regiones cálidas y áridas del continente americano, se da una relación mutualista llamativa entre los arbustos de yuca y las polillas de la yuca. Ningún otro insecto poliniza dichas plantas, y ninguna otra planta alberga a las orugas de la polilla. La polilla hembra recoge el polen de la flor de una yuca, y la deposita en la flor de otra yuca, polinizándola. Luego, la polilla abre un agujero en el ovario y pone un huevo; puede poner varios huevos en la misma flor. Tras la eclosión, las orugas se alimentan de las semillas en desarrollo de la flor, pero no las comen todas, dejando suficientes para que la planta se propague. Si hay demasiados huevos en una flor, la planta se desprende de la flor antes de que salgan las orugas, a las que deja morir. Sin las polillas, las yucas no se polinizarían, y desaparecerían. Sin las yucas, las polillas no tendrían donde poner huevos y alimentar a sus larvas, y tampoco ellas sobrevivirían.





La avispa de los higos y estos mantienen una relación compleja de servicio-recurso en la que la avispa poliniza la higuera, y la higuera aporta un entorno seguro para el desarrollo de los huevos de la avispa.



La ayuda mutua se da en muchas especies.
Pierre-Joseph van Beneden
Zoólogo belga



implicando con ello que una especie perecería sin la otra. Sin hormigas, las acacias carecen de medios para defenderse, y sin acacias, la hormigas no tienen un lugar donde vivir.

Beneficio mutuo

Hay dos tipos principales de mutualismo: las relaciones de servicio-recurso y las de servicio-servicio, definidas en función de si la relación consiste en aportar un servicio o un recurso, siendo habitualmente claves ambos para la supervivencia. Las relaciones de servicio-recurso son comunes en la naturaleza, y el ejemplo más difundido es el de la polinización de las flores por mariposas, polillas, abejas, moscas, avispas, escarabajos, murciélagos o aves. El recurso (el polen) lo aporta la flor, y el servicio (la polinización), el animal. Se estima que casi tres cuartas partes de las plantas con flores (unas 170 000 especies) son polinizadas por unas 200 000 especies animales. Por lo general, los colores o el olor de la flor atraen a un insecto polinizador a beber néctar o a recoger polen, y entonces el polen se pega al cuerpo del insecto para su transporte a la siguiente flor, donde queda depositado. La flor y su polinizador han evolucionado para que el mecanismo funcione de manera eficaz.

Algunas plantas han desarrollado una relación de servicio-recurso en la que son aves o mamíferos los que dispersan las semillas, las esporas o los frutos. Las semillas pueden adherirse al pelaje de un mamífero que se alimente de las hojas de la planta, el cual, al alejarse, las propaga. El olor fétido de algunos hongos (faláceas) atrae a las moscas, que al acudir a lamer la gleba viscosa y alejarse, propaga las esporas. Cuando un ave traga un fruto, lleva consigo las semillas, que no digiere, y las excreta con las heces en otra parte. En todas estas situaciones, las plantas aportan un recurso (alimento), y los mamíferos, moscas y aves, un servicio (transporte).

Aun así, no en todas las relaciones mutualistas participan plantas. En África, por ejemplo, las aves llamadas picabueyes y algunos animales herbívoros, como los impalas y las cebras, mantienen una relación de servicio-recurso diferente. El picabueyes se alimenta de las garrapatas del pelaje del animal, eliminando irritaciones y una fuente de enfermedades. Los picabueyes emiten también llamadas en caso de peligro, que alertan a los mamíferos, además de a las demás aves.

En el mundo de los insectos, algunas hormigas y áfidos mantienen otra clase de mutualismo servicio-recurso. Los áfidos se alimentan de las plantas, y las hormigas protegen a los áfidos. Las hormigas consumen la savia que segregan los áfidos, a los que «ordeñan» rozándolos con las antenas. Las re-

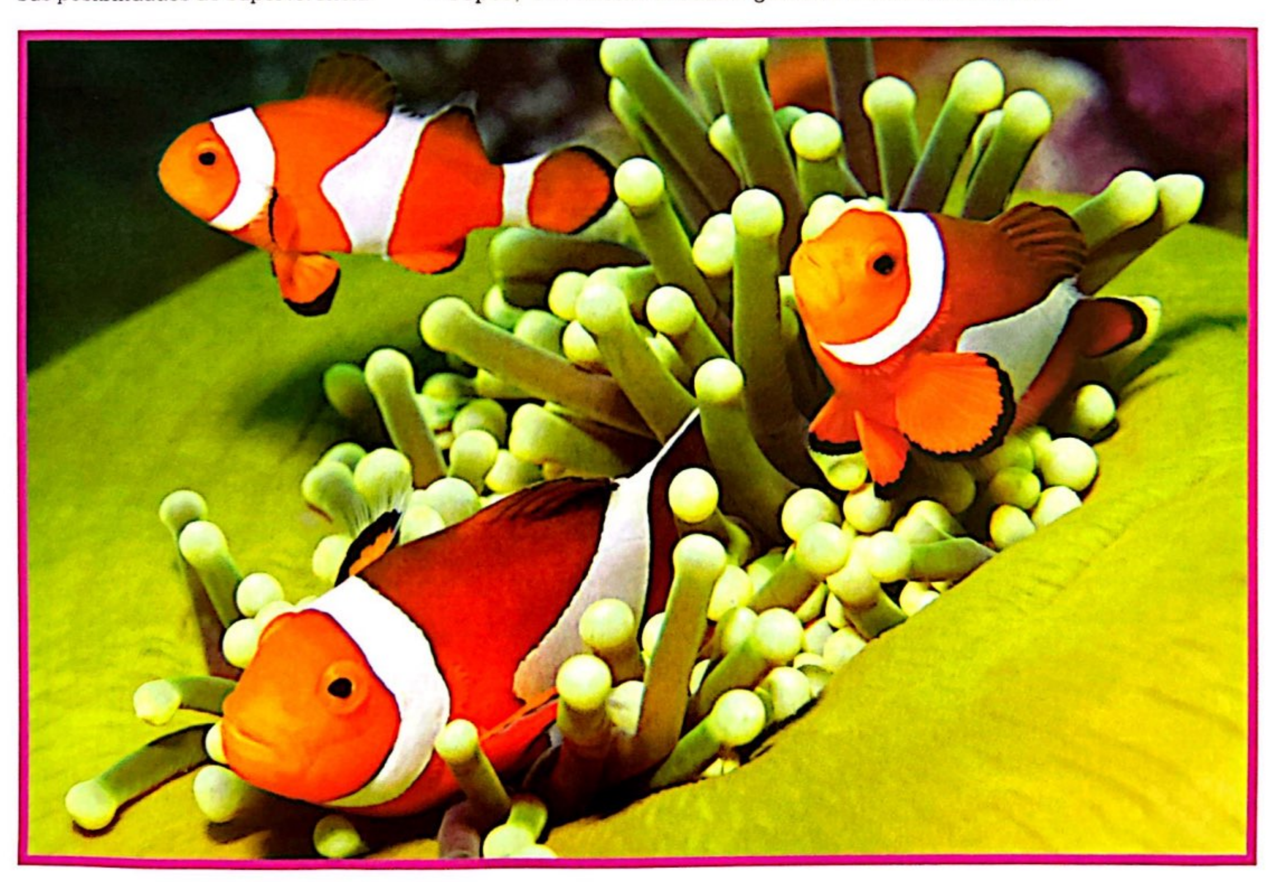
laciones de servicio-servicio, en la que ambos organismos protegen al otro, son mucho menos comunes. Un ejemplo inusual de las mismas tiene lugar en el Pacífico occidental entre unas treinta especies de pez payaso y diez especies de anémonas venenosas. Los nematocistos urticantes llenos de toxinas en los tentáculos de las anémonas matan a la mayoría de los peces pequeños que se acercan, pero no al pez payaso. Una capa gruesa de mucosidad protectora lo hace inmune a la picadura, y le permite vivir entre los tentáculos de las anémonas. A cambio de la protección ofrecida por los tentáculos venenosos de esta, el pez payaso mantiene a raya a los peces mariposa predatorios, retira los parásitos de la anémona y le aporta los nutrientes que contienen sus heces.

El pez payaso y la anémona podrían sobrevivir ambos sin la protección del otro, pero su relación mutualista coevolutiva mejora mucho sus posibilidades de supervivencia.

Evolución cooperativa

Las relaciones entre organismos que aportan servicios y recursos se han desarrollado a lo largo de millones de años, en un proceso llamado coevolución: la evolución de dos o más especies que se afectan recíprocamente.

El término fue acuñado por los biólogos estadounidenses Paul Ehrlich y Peter Raven en 1964; sin embargo, un siglo antes de que existiera, Charles Darwin y Alfred Russel Wallace eran ya conscientes del concepto, en buena medida gracias a sus observaciones de las orquídeas. Al igual que muchas plantas con flores, las orquídeas dependen de insectos polinizadores. Algunas cuentan con estructuras extraordinarias para contener néctar y polen. Para atraer a los polinizadores, las plantas les ofrecen un néctar energético. Esto fascinaba a Darwin, al que regalaron un ejemplar de orquídea de Madagascar en 1862. La flor tiene un nectario de casi 30 cm de largo. Darwin y Wallace especularon que solo una polilla grande podía tener una probóscide lo bastante larga para llegar al néctar, teoría que acabó por demostrarse cierta en 1997. Si el nectario fuese más corto, las polillas podrían beber sin recoger polen, y no polinizarían la flor. Si fuera más largo, las polillas no la visitarían. ■



LOS CARACOLES DE MAR SON COMO LOBOS A CAMARA LENTA

ESPECIES CLAVE



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Robert Paine (1933–2016)

ANTES
Década de 1950 En Kenia, el agricultor y ambientalista David Sheldrick introduce elefantes en el Parque Nacional de Tsavo East, y logra un gran incremento de la biodiversidad.

1961 El trabajo de campo del ecólogo estadounidense Joseph Connell en Escocia muestra cómo retirar caracoles marinos predatorios altera la distribución de los cirrípedos, sus presas.

DESPUÉS
1994 En EE UU, el grupo de ecólogos de Brian Miller explica en un trabajo el papel de los perritos de la pradera como especie clave.

2016 El trabajo de campo lleva a la ecóloga Sarah Gravem a concluir que los organismos pueden ser especies clave en unos lugares, y no en otros.

Una especie clave tiene un papel vital para el funcionamiento de un ecosistema, aunque suela representar una parte pequeña de la biomasa del mismo. Como una especie clave ejerce un efecto desproporcionado sobre su medio en relación con su biomasa, si desaparece de un ecosistema, este cambiará de forma drástica. La importancia de las especies clave la puso de manifiesto el biólogo estadounidense Robert Paine –quien adoptó el término «clave» referido a la pieza central de un arco o bóveda que impide que el conjunto se desplome– en su artículo de 1969 «A note on trophic complexity and community stability».



¿Quieres un mecánico capaz de nombrar, enumerar y contar todas las partes del motor o uno que comprenda cabalmente cómo interactúa cada parte con las otras para tener un motor funcional?
Robert Paine



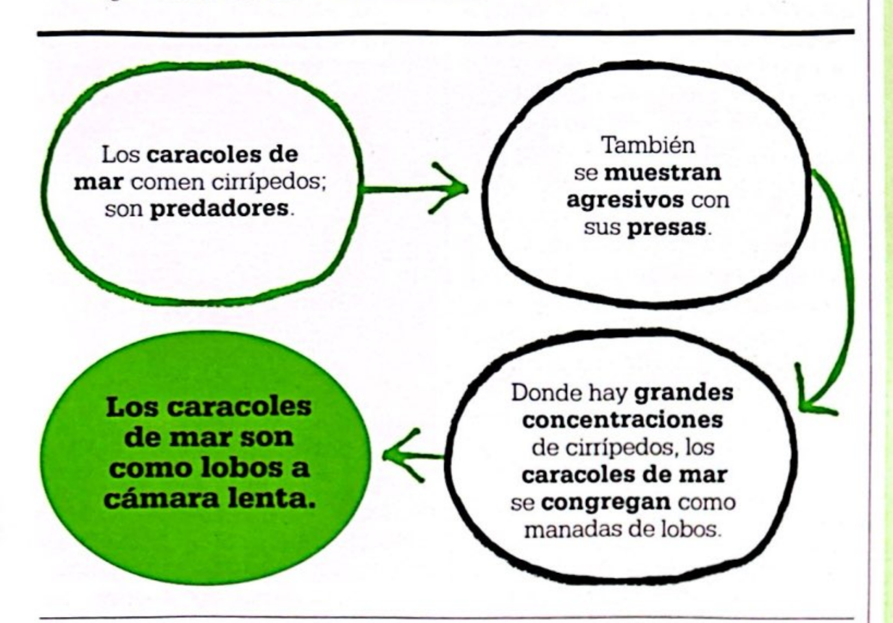
El concepto clave

En la década de 1960, Paine pasó varios años estudiando a los animales de la zona intermareal de la isla de Tatoosh, en la costa pacífica del estado de Washington. Quitó las estrellas de mar ocres, y observó cómo llegaban a dominar la zona sus presas principales, los mejillones, reemplazando de esta forma a otras especies subordinadas. La retirada de una única especie clave tenía un impacto claro sobre muchas otras, y Paine desarrolló la idea para incluir el concepto de las cascadas tróficas, los fuertes efectos que recorren un ecosistema y sus organismos de arriba abajo. Desde el trabajo de Paine con las estrellas de mar, varios estudios han demostrado que

Perritos de la pradera de cola negra oteando fuera de la madriguera, en Wyoming (EE UU). El estudio que se llevó a cabo sobre esta especie reveló su papel clave en la diversidad de su hábitat.



Véase también: Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Mutualismos 56–59 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Cascadas tróficas 140–143



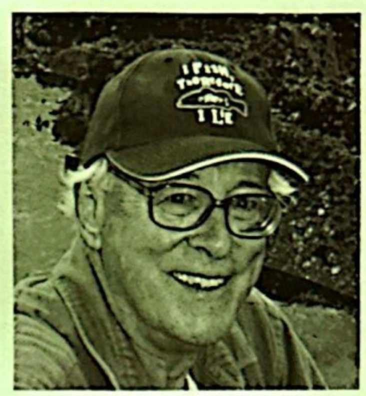
hay muchas otras especies clave, y que cada una cumple su papel de forma diferente.

Ingenieros ecológicos

Los perritos de la pradera del Medio Oeste de EE UU son un buen ejemplo de especie clave, y su impacto es el resultado de su actividad ingenieril. Colonias enormes de estos pequeños mamíferos excavan redes de túneles bajo las praderas. Duermen y cuidan a sus crías en estas madrigueras extensas, convirtiendo la pradera en un hábitat adecuado. La excavación constante airea el suelo, y permite que los nutrientes y el agua de la lluvia y la nieve lleguen a mayor profundidad de lo que harían en otro caso. El suelo húmedo y rico en nutrientes favorece el crecimiento de plantas diversas, y aves como el chorlito llanero se alimentan y anidan entre las hierbas bajas. Depredadores como el halcón ferruginoso y el hurón patinegro llegan atraídos por sus presas, y los hurones y salamandras tigre se refugian en sus madrigueras. Casi 150 especies de plantas y animales se benefician de las colonias de perritos de la pradera. Aunque hay «perdedores» –sobre todo los vertebrados que prefieren la vegetación alta–, la presencia de los perritos incrementa la biodiversidad general. Cuando desaparece una colonia, la hierba baja es sustituida por mezquites, los chorlitos abandonan la zona y desciende el número de depredadores.

Limpiadores de coral

La lora princesa del Caribe es otra especie clave, en este caso por las consecuencias de su alimentación. Se trata de un pez que vive junto a los arrecifes de coral, donde los corales compiten por la luz, los nutrientes y el espacio. La lora princesa raspa la superficie de los corales para alimentarse de las algas. Si no lo hiciera, crecerían matas de algas sobre los corales, sofocando y causando daños químicos al arrecife. En caso de sobrepesca o epidemia, la salud »



Robert Paine

Nacido en 1933, en Cambridge (Massachusetts), Robert Paine estudió en Harvard. Después de un tiempo sirviendo en el ejército, donde fue jardinero de batallón, Paine se dedicó a estudiar los invertebrados marinos. El estudio que llevó a cabo de la relación entre estrellas de mar y mejillones en la costa del Pacífico le llevó a proponer el concepto de especie clave, por el impacto desproporcionado que puede tener una sola especie sobre un ecosistema. Paine trabajó durante la mayor parte de su carrera en la Universidad de Washington, donde popularizó los experimentos de manipulación de campo. Recibió el Premio Internacional Cosmos de la Academia Nacional de Ciencias de EE UU en 2013, y murió en 2016.

Obras principales

1966 «Food web complexity and species diversity», *American Naturalist*.
1969 «A note on trophic complexity and community stability», *American Naturalist*.
1994 *Marine rocky shores and community ecology: an experimentalist's perspective*.

de los arrecifes se deterioraría rápidamente.

Creadores de paisajes

En las sabanas africanas, los elefantes derriban árboles pequeños y medianos para alimentarse, manteniendo así despejada la sabana y abriendo nuevas zonas de lo que antes era bosque. Esta conducta destructiva ayuda a mantener el hábitat del que dependen para alimentarse animales como las cebras, los antílopes y los ñus, y ayuda también indirectamente a los depredadores de estos –leones, guepardos y hienas– y a los mamíferos menores que cavan madrigueras en el suelo de la sabana. Sin elefantes, estos animales no tardarían en desaparecer. Los elefantes son también muy importantes como propagadores de semillas, que pasan sin digerir por su intestino, son defecadas y, luego, germinan. De ellos depende hasta un tercio de las especies arbóreas de África occidental para dispersar sus semillas, y los elefantes cavan y mantienen también pozos, que benefician a muchas otras especies.

Los elefantes asiáticos que viven en el bosque ejercen un papel similar. En el Sureste Asiático, se abren paso por los huecos y claros del bosque, despejando partes del dosel arbóreo. Las plantas nuevas que allí crecen traen mayor diversidad vegetal, y permiten también prosperar a una gama más amplia de animales.

Depredadores clave

La nutria marina es un mamífero de las aguas costeras pacíficas de América del Norte. Fue objeto de una caza intensa por su piel durante los siglos XVIII y XIX. A principios del siglo XX había desaparecido de muchas zonas, y se creía que su población total era inferior a unos dos mil individuos. Desde 1911, la protección legal ha logrado una recuperación lenta.

Las nutrias son importantes porque comen una gran cantidad de erizos de mar. Estos invertebrados se alimentan de la parte baja de los tallos de algas kelp, que crecen desde el lecho marino, por lo cual quedan a la deriva y mueren. Si desaparece

Territorios de las manadas de lobos en Yellowstone

Cada manada de lobos del Parque Nacional tiene un territorio propio. Varios territorios se solapan, y el número de lobos fluctúa de un año a otro, con 108 lobos registrados en 2016.



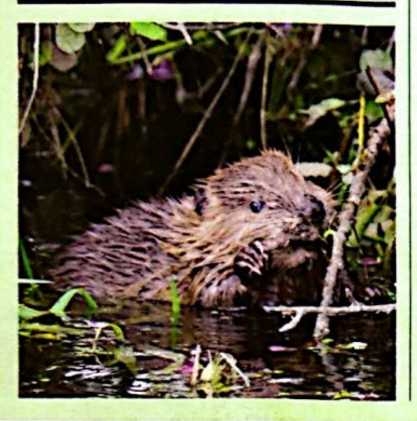
Los efectos ecológicos de las nutrias marinas afectan de un modo u otro a todas las especies de la zona costera.

James Estes

Biólogo marino estadounidense



Reintroducción de los castores en Reino Unido



Los castores fueron exterminados en Reino Unido hace 400 años, y hoy se comprende mejor la función de este mamífero: son ingenieros ecológicos que construyen presas y canales, y su presencia hace incrementar la biodiversidad.

En 2009 se reintrodujeron once castores en el bosque de Knapdale (Escocia); y, en 2011, el Devon Wildlife Trust introdujo dos en un recinto vallado. Ambas iniciativas fueron monitorizadas para conocer su impacto sobre el medio. En Knapdale, las presas de los castores cambiaron el nivel del agua de un lago, y los de Devon construyeron varias presas en la cabecera del río Tamar, creando trece pozas de agua dulce y humedeciendo la tierra en torno. En Devon, las zonas húmedas creadas por los castores hicieron aumentar el número de especies de briofitas (musgos y hepáticas), y la gama de invertebrados acuáticos pasó de 14 especies a 41. El mayor número de insectos voladores hizo aumentar también la diversidad de los murciélagos, atrayendo a dos especies raras a nivel nacional. Hay planes en marcha para reintroducir castores en otros lugares de Reino Unido.

el kelp, desaparecen los otros muchos invertebrados marinos a los que sirve de alimento. Los «bosques» de kelp absorben también gran cantidad de dióxido de carbono atmosférico, y al frenar las corrientes protegen la costa de las marejadas ciclónicas. La protección que ofrecen las nutrias marinas al kelp en las costas de mar abierto es, por tanto, especialmente importante.

A diferencia de la nutria marina, algunas especies clave son también superdepredadores en la cúspide de la cadena alimenticia, como el lobo gris. Hasta 1995, no había habido lobos en el Parque Nacional de Yellowstone desde hacía 70 años. Abundaban los uapitíes, pero solo había una colonia de castores. Aquel año se introdujeron 31 lobos en el parque, y en 2001 sobrepasaban los 100, debido sobre todo a la abundancia de uapitíes.

La presencia de los lobos en el parque disuadió a los uapitíes de ramonear en los sauces, álamos temblones y álamos de América del Norte en sus lugares predilectos, de los que se marcharon. Esto permitió regenerarse a las plantas, que sirvieron de alimento a otros herbívoros, como los castores. En 10 años, el número de colonias de castores pasó de una a nueve. Las presas de los castores hicieron revivir los humedales, cuyas formas de vida propias prosperaron. La proliferación de cadáveres de uapití benefició también a los carroñeros, sobre todo a los coyotes, zorros rojos, osos grizzly, águilas reales, cuervos grandes y urracas, además de a varias especies menores.

El jaguar es el superdepredador de los bosques de América del Sur, América Central y México, y más de 85 especies son sus presas. Hay muy pocos jaguares en cualquier área dada, pero es considerable su impacto sobre el número de otros depredadores –caimanes, serpientes, peces grandes y aves grandes– y de herbívoros como capibaras y ciervos en los ecosistemas. Sin jaguares, los herbívoros podrían devorar la mayor parte de las plantas y destruir así el hábitat del que dependen tantas otras especies.

Plantas clave

No todas las especies clave son animales. Un ejemplo es la higuera, de la que hay unas 750 especies, la mayoría en bosques tropicales. En este hábitat, la mayoría de las plantas de fruto carnoso comparten uno o dos picos de maduración al año. Los higos dan fruto todo el año, sustentando a muchos animales mientras no dan fruto otros árboles. Más del 10 % de las especies de aves del mundo y el 6 % de las de mamíferos (un total de 1274 especies) consumen higos, como hace un número reducido de reptiles e incluso peces. Las higueras, por tanto, aportan un sustento vital a las especies frugívoras. Sin ellas mermaría el número de murciélagos de la fruta, aves y otras criaturas, o hasta desaparecerían. ■



Protegiendo especies clave como los perritos de la pradera, el público puede aprender el valor de la conservación de los ecosistemas.

Brian Miller

Ecólogo estadounidense



de los arrecifes se deterioraría rápidamente.

Creadores de paisajes

En las sabanas africanas, los elefantes derriban árboles pequeños y medianos para alimentarse, manteniendo así despejada la sabana y abriendo nuevas zonas de lo que antes era bosque. Esta conducta destructiva ayuda a mantener el hábitat del que dependen para alimentarse animales como las cebras, los antílopes y los ñus, y ayuda también indirectamente a los depredadores de estos –leones, guepardos y hienas– y a los mamíferos menores que cavan madrigueras en el suelo de la sabana. Sin elefantes, estos animales no tardarían en desaparecer. Los elefantes son también muy importantes como propagadores de semillas, que pasan sin digerir por su intestino, son defecadas y, luego, germinan. De ellos depende hasta un tercio de las especies arbóreas de África occidental para dispersar sus semillas, y los elefantes cavan y mantienen también pozos, que benefician a muchas otras especies.

Los elefantes asiáticos que viven en el bosque ejercen un papel similar. En el Sureste Asiático, se abren paso por los huecos y claros del bosque, despejando partes del dosel arbóreo. Las plantas nuevas que allí crecen traen mayor diversidad vegetal, y permiten también prosperar a una gama más amplia de animales.

Depredadores clave

La nutria marina es un mamífero de las aguas costeras pacíficas de América del Norte. Fue objeto de una caza intensa por su piel durante los siglos XVIII y XIX. A principios del siglo XX había desaparecido de muchas zonas, y se creía que su población total era inferior a unos dos mil individuos. Desde 1911, la protección legal ha logrado una recuperación lenta.

Las nutrias son importantes porque comen una gran cantidad de erizos de mar. Estos invertebrados se alimentan de la parte baja de los tallos de algas kelp, que crecen desde el lecho marino, por lo cual quedan a la deriva y mueren. Si desaparece

Territorios de las manadas de lobos en Yellowstone

ESCALA

10 km

Cada manada de lobos del Parque Nacional tiene un territorio propio. Varios territorios se solapan, y el número de lobos fluctúa de un año a otro, con 108 lobos registrados en 2016.



Los efectos ecológicos de las nutrias marinas afectan de un modo u otro a todas las especies de la zona costera.

James Estes

Biólogo marino estadounidense



Reintroducción de los castores en Reino Unido



Los castores fueron exterminados en Reino Unido hace 400 años, y hoy se comprende mejor la función de este mamífero: son ingenieros ecológicos que construyen presas y canales, y su presencia hace incrementar la biodiversidad.

En 2009 se reintrodujeron once castores en el bosque de Knapdale (Escocia); y, en 2011, el Devon Wildlife Trust introdujo dos en un recinto vallado. Ambas iniciativas fueron monitorizadas para conocer su impacto sobre el medio. En Knapdale, las presas de los castores cambiaron el nivel del agua de un lago, y los de Devon construyeron varias presas en la cabecera del río Tamar, creando trece pozas de agua dulce y humedeciendo la tierra en torno. En Devon, las zonas húmedas creadas por los castores hicieron aumentar el número de especies de briofitas (musgos y hepáticas), y la gama de invertebrados acuáticos pasó de 14 especies a 41. El mayor número de insectos voladores hizo aumentar también la diversidad de los murciélagos, atrayendo a dos especies raras a nivel nacional. Hay planes en marcha para reintroducir castores en otros lugares de Reino Unido.

el kelp, desaparecen los otros muchos invertebrados marinos a los que sirve de alimento. Los «bosques» de kelp absorben también gran cantidad de dióxido de carbono atmosférico, y al frenar las corrientes protegen la costa de las marejadas ciclónicas. La protección que ofrecen las nutrias marinas al kelp en las costas de mar abierto es, por tanto, especialmente importante.

A diferencia de la nutria marina, algunas especies clave son también superdepredadores en la cúspide de la cadena alimenticia, como el lobo gris. Hasta 1995, no había habido lobos en el Parque Nacional de Yellowstone desde hacía 70 años. Abundaban los uapitíes, pero solo había una colonia de castores. Aquel año se introdujeron 31 lobos en el parque, y en 2001 sobrepasaban los 100, debido sobre todo a la abundancia de uapitíes.

La presencia de los lobos en el parque disuadió a los uapitíes de ramonear en los sauces, álamos temblones y álamos de América del Norte en sus lugares predilectos, de los que se marcharon. Esto permitió regenerarse a las plantas, que sirvieron de alimento a otros herbívoros, como los castores. En 10 años, el número de colonias de castores pasó de una a nueve. Las presas de los castores hicieron revivir los humedales, cuyas formas de vida propias prosperaron. La proliferación de cadáveres de uapití benefició también a los carroñeros, sobre todo a los coyotes, zorros rojos, osos grizzly, águilas reales, cuervos grandes y urracas, además de a varias especies menores.

El jaguar es el superdepredador de los bosques de América del Sur, América Central y México, y más de 85 especies son sus presas. Hay muy pocos jaguares en cualquier área dada, pero es considerable su impacto sobre el número de otros depredadores –caimanes, serpientes, peces grandes y aves grandes– y de herbívoros como capibaras y ciervos en los ecosistemas. Sin jaguares, los herbívoros podrían devorar la mayor parte de las plantas y destruir así el hábitat del que dependen tantas otras especies.

Plantas clave

No todas las especies clave son animales. Un ejemplo es la higuera, de la que hay unas 750 especies, la mayoría en bosques tropicales. En este hábitat, la mayoría de las plantas de fruto carnoso comparten uno o dos picos de maduración al año. Los higos dan fruto todo el año, sustentando a muchos animales mientras no dan fruto otros árboles. Más del 10 % de las especies de aves del mundo y el 6 % de las de mamíferos (un total de 1274 especies) consumen higos, como hace un número reducido de reptiles e incluso peces. Las higueras, por tanto, aportan un sustento vital a las especies frugívoras. Sin ellas mermaría el número de murciélagos de la fruta, aves y otras criaturas, o hasta desaparecerían. ■



Protegiendo especies clave como los perritos de la pradera, el público puede aprender el valor de la conservación de los ecosistemas.

Brian Miller

Ecólogo estadounidense





LA CONDICION FISICA DE UN ANIMAL DEPENDE DE SU EFICIENCIA

TEORÍA DEL FORRAJEO ÓPTIMO

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Ronald Pulliam (n. 1945), **Graham Pyke** (n. 1948), **Eric Charnov** (n. 1947)

ANTES
1966 John Merritt Emlen, Robert MacArthur y Eric Pianka esbozan el concepto del forrajeo óptimo en dos artículos publicados en la revista *American Naturalist.*

DESPUÉS
1984 El zoólogo argentino-británico Alejandro Kacelnik estudia la conducta forrajera de los estorninos para ilustrar el teorema del valor marginal.

1986 El ecólogo belga Patrick Meire investiga la selección de presas por los ostreros.

1989 T. J. Wolfe y Paul Schmid-Hempel, científicos ambientales suizos, estudian cómo el peso del néctar que cargan las abejas afecta a su conducta al buscar comida.

Todas las plantas y animales de la Tierra necesitan recursos para sobrevivir. Las plantas obtienen nutrientes y agua del suelo, y la luz solar aporta la energía para la fotosíntesis. Por lo general, los animales han de esforzarse más para encontrar alimento: tienen que moverse, lo cual requiere recursos extra. La teoría del forrajeo óptimo (TFO) propone que los animales tratan de obtener recursos del modo más eficiente para evitar gastar energía adicional. Buscar y capturar alimento consume energía y tiempo. El animal debe obtener el máximo beneficio con el mínimo esfuerzo para mantener una condición física óptima, y la TFO ayuda a pr decir la mejor estrategia que pued emplear un animal para lograrlo.



La dieta debe ser amplia cuando el alimento escasea, y reducida si abunda.
Eric Pianka



Teorías del forrajeo

La primera teoría del forrajeo p animales salvajes no surgió has mediados de la década de 1960, cua do los estadounidenses Robert Ma Arthur y Eric Pianka estudiaron la causas de que, con una gama d alimentos disponible, los animale se limitaran a menudo a unas poca presas favoritas. Afirmaron que l selección natural favorece a los an males cuyo comportamiento max miza la ganancia de energía neta p unidad de tiempo invertido en co seguir alimento. Este tiempo inclu la búsqueda de la presa y el matar y comerla (tiempo de manejo).

Estas ideas fueron desarrollada por los ecólogos estadounidense Ronald Pulliam y Eric Charnov y australiano Graham Pyke. La TF parece funcionar mejor para forraje ros móviles en busca de presas in móviles, y algunos estudiosos cree que es menos relevante cuando la presas son móviles.

Opciones clave

Los animales deben elegir qué tip de alimento comer, y la opción ra

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Mutualismos 56–59



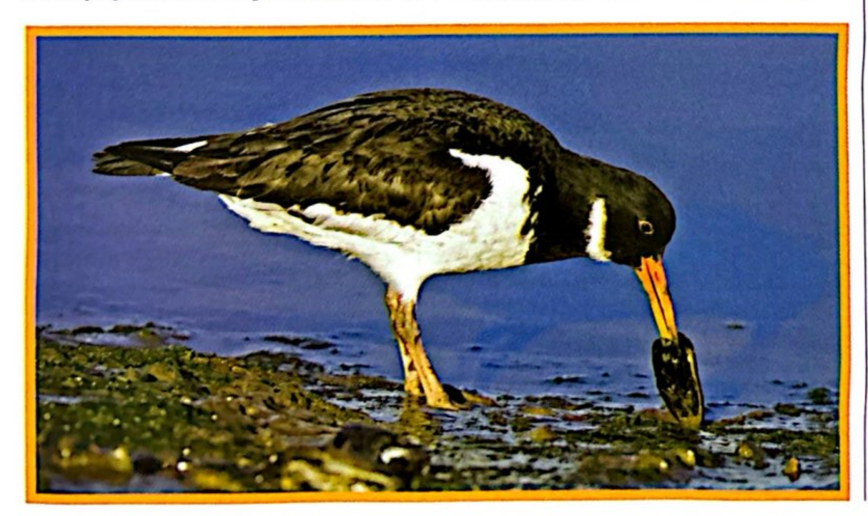
El comportamiento esperado de los animales con los recursos disponibles sirve para predecir la estructura biótica de las comunidades.
Ronald Pulliam

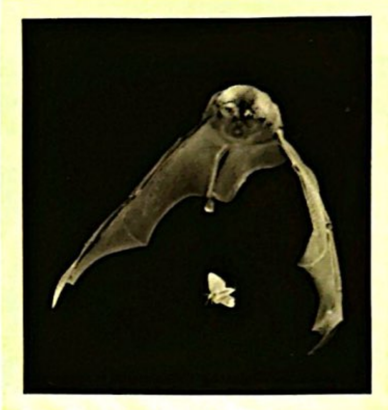


vez está clara. Por ejemplo, los ecólogos estadounidenses Howard Richardson y Nicolaas Verbeek estudiaron a los cuervos que comen almejas en la zona intermareal de Columbia Británica. Los cuervos invierten mucho esfuerzo para desenterrar almejas, abrir las conchas y comer el animal del interior. Los ecólogos observaron que no abrían las almejas de menor tamaño, y concluyeron que los cuervos debían hacer un compromiso energético entre tiempo de manejo y alimento aprovechable. El tiempo y energía invertidos en abrir una almeja pequeña estaba mejor invertido buscando otra más grande. Un estudio similar sobre ostreros y mejillones observó que dichas aves despreciaban los mejillones de mayor tamaño: sus conchas más gruesas y cubiertas de balanos son más difíciles de abrir, y a los ostreros les beneficiaba más buscar mejillones de concha fina, pese a su menor tamaño.

Los animales deben elegir también acerca de dónde y cuándo alimentarse. Cuanto más tiempo pasa un estornino en una parcela de pradera, por ejemplo, más difícil será encontrar presas, así que deben decidir cuándo abandonarla por otra, lo cual ejemplifica el teorema del valor marginal. Hay otros factores a considerar, tales como la presencia de depredadores, el número de animales que compiten por el mismo alimento y el impacto de la actividad humana. ■

Los ostreros, pese a su nombre, dependen de los berberechos y mejillones como fuente principal de alimento. A falta de estos bivalvos, deben buscar comida tierra adentro.





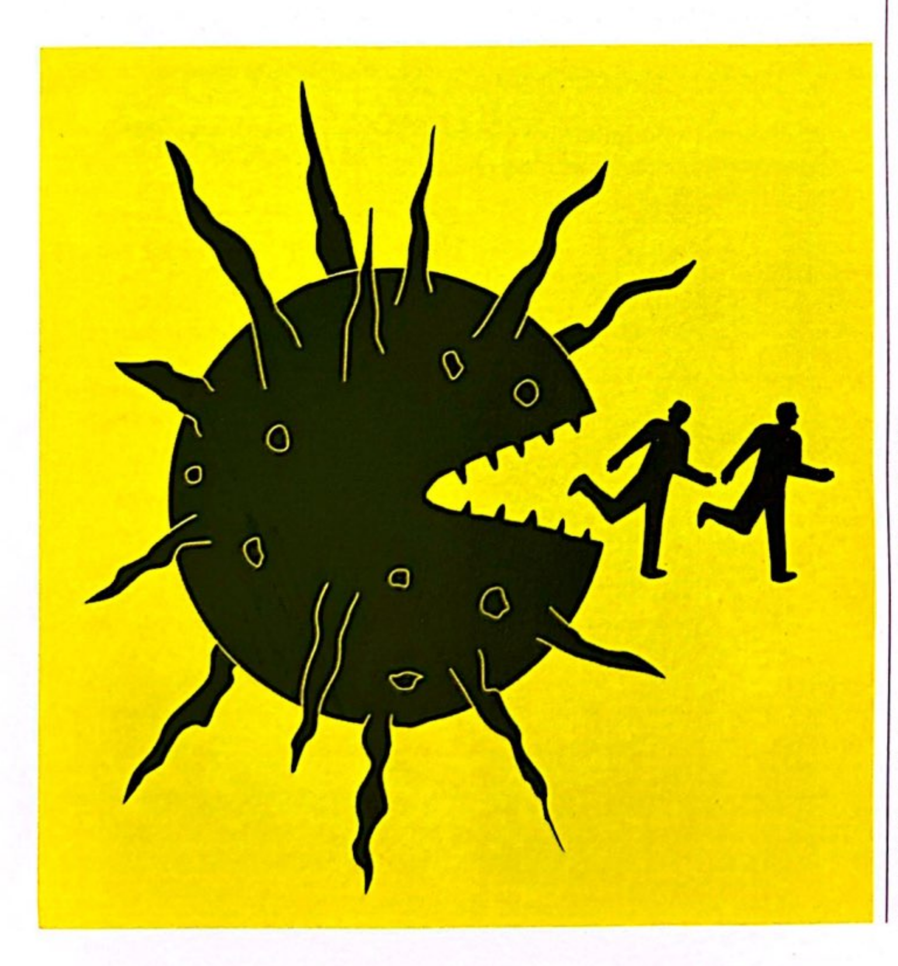
Murciélagos ecolocalizadores

Los avances tecnológicos han sido muy útiles para estudiar las estrategias de caza de los animales. Los murciélagos insectívoros (micromurciélagos) utilizan la ecolocalización para encontrar y atrapar presas como polillas y mosquitos de noche. Un equipo de científicos japoneses se propuso estudiar los hábitos predatorios de los murciélagos mediante el uso de micrófonos y el análisis de modelos matemáticos. Registraron las llamadas y trayectorias de vuelo de los murciélagos, y descubrieron que a menudo dirigían el sonar no solo a la presa inmediata, sino al siguiente objetivo que estaban ya enfilando.

Asimismo, el equipo halló pruebas de que los murciélagos escogen trayectorias de vuelo que les permiten planear dos pasos por anticipado, como los jugadores de ajedrez. No solo maximizan la ganancia de energía con objetivos múltiples, sino que también minimizan el gasto energético al reducir la distancia recorrida persiguiendo insectos. Este comportamiento encaja bien con la teoría del forrajeo óptimo.

PARASITOS Y PATOGENOS CONTROLAN POBLACIONES COMO PREDADORES

EPIDEMIOLOGÍA ECOLÓGICA



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Roy Anderson (n. 1947), **Robert May** (n. 1936)

ANTES
1662 El estadístico inglés John Graunt clasifica las causas de muerte en Londres en *Natural and political observations made upon the bills of mortality.*

1927 Los escoceses A. G. McKendrick y W. O. Kermack crean un modelo epidémico para individuos infectados, no infectados e inmunes.

DESPUÉS
1996 James S. Koopman, epidemiólogo estadounidense, reclama un mayor uso de tecnologías computacionales para simular los brotes y la difusión de enfermedades.

2018 Un equipo global rastrea el origen y la difusión de un hongo que devasta poblaciones de ranas.

La epidemiología es el estudi de la propagación de las en fermedades en una población En un principio se aplicó a pobla ciones humanas, pero sus método han resultado eficaces también par construir modelos de poblaciones d otros seres vivos.

Los ecólogos saben desde hac tiempo que el tamaño de una pobla ción de animales o plantas y su tas de crecimiento dependen de la dispo nibilidad de alimento y espacio y d los niveles de depredación. En la dé cada de 1970, el epidemiólogo britá nico Roy Anderson y el científico aus traliano Robert May mostraron cóm los parásitos e infecciones de patóge nos como bacterias y virus limitaba

Véase también: El medio microbiológico 84–85 ▪ Microbiología 102–103 ▪ La ubicuidad de las micorrizas 104–105 ▪ Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157

Mapa de las muertes por cólera en Londres en 1854

CLAVE

- 1–4 muertes
- 5–9 muertes
- 10–15 muertes
- Surtidor de agua en Broad Street

Oxford Street
Soho Square
Broad Street
Regent Street
Golden Square
Brewer Street

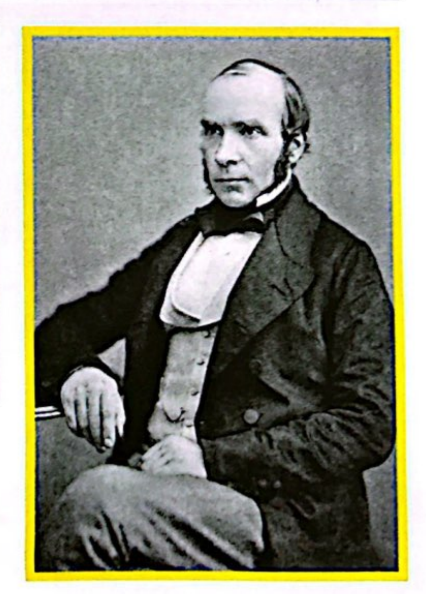
Las muertes durante el brote de cólera de 1854 en Londres estaban vinculadas al surtidor de agua del centro. El agua había sido contaminada por las aguas fecales de una familia infectada.

el tamaño de las poblaciones. Entre los borregos cimarrones, por ejemplo, la principal causa de muerte son los nematodos estrongílidos, mientras que la mayoría de las aves salvajes mueren por infecciones virales.

En la ecología, las implicaciones de los efectos de las enfermedades van más allá. Los virus matan hasta el 40 % de las bacterias oceánicas cada día, y esto causa la llamada derivación viral, por la que los nutrientes que ascenderían por la cadena trófica revierten de nuevo a la base.

Inicios humanos

La epidemiología nació con el trabajo del médico John Snow, testigo de una epidemia de cólera en el distrito londinense del Soho en 1854. Entonces se creía que las enfermedades se debían a miasmas procedentes de los muertos y moribundos. Snow, que no fue el primero en cuestionar tal teoría, desconfiaba especialmente de ella en el caso del cólera. En 1854, Snow marcó los casos de cólera en un mapa del Soho, y vio que los hogares afectados usaban el agua de un surtidor en Broad Street (luego llamada Broadwick). La clausura del surtidor puso fin a la epidemia, demostrando »



El británico John Snow se enfrentó a lo establecido para que se aceptara su idea de que el cólera se transmite por el agua. La revista médica *The Lancet* acabó dándole la razón en 1866.

La sequía y las enfermedades vegetales

Como otros agentes causantes de enfermedad, los patógenos de las plantas necesitan individuos susceptibles a la infección. Los periodos de sequía frenan la tasa reproductiva y de crecimiento de las plantas, y reducen la prevalencia de la enfermedad.

La aridez, sin embargo, debilita también a las plantas, y las expone a patógenos que prosperan en condiciones secas. Entre estos, hay varios hongos que atacan las hojas de cereales, legumbres y frutales. Estos hongos se han adaptado para vivir en estado latente en el suelo como cuerpos microscópicos endurecidos. Resisten muchos años en suelo seco, pero, al humedecerse este, deben hallar un huésped en pocas semanas o morir. No necesariamente matan al huésped. Estudios recientes con garbanzos indican que, aunque las infecciones por hongos aumentan durante las sequías, la tasa de mortalidad de las plantas afectadas desciende.



La sequía estival solo permite un crecimiento escaso de brotes de cebada. La falta de agua y el calor reducen la resistencia a los hongos que atacan las raíces.

que el cólera se transmitía por el agua o los alimentos contaminados por esta. Una década después, la teoría germinal de Pasteur afirmaba que las enfermedades, como la putrefacción, eran obra de microorganismos.

Modelo de enfermedad

En sus estudios de la década de 1970, Anderson y May construyeron primero un modelo matemático para mostrar cómo afectaba un microorganismo a una población, del que dedujeron una serie de ecuaciones para explicar el impacto en la vida real de diversos patógenos, desde bacterias y virus hasta helmintos (gusanos) y larvas de insecto parasitarios.

En su modelo, se dividió un número de ratones en tres grupos: ratones susceptibles (no infectados), ratones infectados y ratones que habían sobrevivido a la infección y eran inmunes. A diferencia de en muchos modelos epidemiológicos anteriores, la población total no era un número fijo, sino que se podía ampliar por reproducción o adición de otras poblaciones. Los ratones morían también por causas naturales. A falta de enfermedades, el total permanecía más o menos estable, equilibrando la tasa de ratones añadidos la de mortalidad.



Usados cabalmente, los modelos matemáticos no son ni más ni menos que herramientas para pensar de modo preciso.

Roy Anderson y Robert May





Un árbol de Yorkshire del Norte afectado por la grafiosis, enfermedad causada por un hongo propagado por el escarabajo *Scolytus multistriatus*, introducido por accidente en Europa y América desde Asia.

En aras de la simplicidad, el modelo suponía que las enfermedades se transmitían por contacto entre ratones infectados y no infectados. Como no todos los infectados morían, el modelo incluía también una tasa de recuperación. Los ratones que se recuperaban eran inmunes, al menos en principio. La inmunidad a los virus es más o menos de por vida, pero, con el tiempo, es posible volverse susceptible de nuevo a la misma infección bacteriana. Por lo tanto, los cálculos incluyeron también una tasa de pérdida de inmunidad.

Combinando todo ello, Anderson y May plantearon varias ecuaciones para predecir la tasa de cambio poblacional en los tres grupos iniciales de ratones no infectados pero susceptibles, de ratones infectados y de supervivientes inmunes. Las ecuaciones se podían sumar para obtener la tasa de cambio total de la población.

A partir de sus cálculos, dedujeron que una enfermedad persistirá en una población cuyo punto de equilibrio (la tasa de nuevas adiciones



Enfermedades como el sarampión y la varicela, de infección corta e inmunidad duradera, tienden a exhibir patrones epidémicos.
Roy Anderson



equilibrada por la de mortalidad) es mayor que los efectos combinados de la mortalidad natural, la mortalidad por enfermedad y las tasas de recuperación y transmisión. Mientras la enfermedad esté presente, el punto de equilibrio será más bajo que si no lo está. Si el punto de equilibrio de una población afectada por la enfermedad es más bajo que los efectos combinados de las muertes, las recuperaciones y la tasa de transmisión, la enfermedad será eliminada. Una vez libre una población de la enfermedad, su punto de equilibrio regresará al nivel anterior.

Aplicación al mundo real

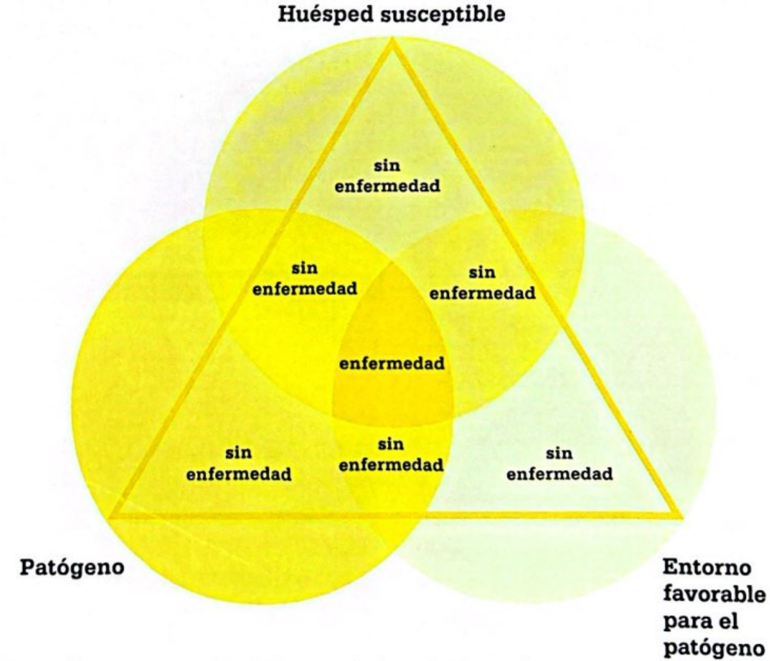
Anderson y May tenían que mostrar que con su modelo podían hacer predicciones precisas para una población real, lo cual hicieron con los datos de un estudio con ratones de laboratorio infectados con una enfermedad bacteriana, la pasteurelosis. Los datos incluían el impacto sobre la población de añadir individuos a distintas tasas. Los datos observados confirmaron las predicciones, y pudieron considerarse los efectos de valores hipotéticos. Hallaron, por ejemplo, que, cuando la tasa de ratones añadidos era mayor, la enfermedad tenía el mayor impacto sobre la cifra de población. Esto indica que las especies con tasas reproductivas altas (que introducen una descendencia no infectada numerosa) tienen las mayores probabilidades de sufrir enfermedades endémicas en sus poblaciones, y su número se resiente más que el de especies de reproducción más lenta. También exploraron los efectos sobre las poblaciones de enfermedades de diferente intensidad.

A diferencia de las enfermedades endémicas, en las que el nivel de infección de la población se mantiene constante, en las poblaciones aparecen epidemias cuando la tasa de crecimiento de todos los miembros infectados y no infectados es baja comparada con la tasa de mortalidad que causa la enfermedad. El número de infectados asciende hasta un máximo, y luego cae. Las epidemias se producen también cuando una enfermedad no es particularmente mortífera, pero ralentiza la tasa de crecimiento de la población; esto ha ocurrido con enfermedades humanas como el sarampión y la varicela.

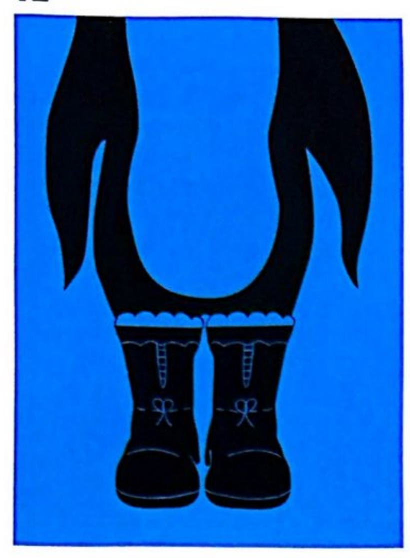
Aplicando la teoría

Las características de la enfermedad y sus efectos sobre poblaciones de animales y plantas tienen una importancia ecológica creciente. Los productores de alimentos, por ejemplo, se benefician de los estudios sobre parásitos y la dinámica de enfermedades que afectan a los cultivos y al ganado. Los conservacionistas emplean también la epidemiología para predecir cómo afectan las enfermedades exóticas y los parásitos invasivos a los ecosistemas frágiles. ■

Diagrama de Venn de la epidemiología ecológica



Un patógeno ataca cuando hay un huésped adecuado en un entorno favorable a la infección, como en la intersección de los círculos. La diarrea, por ejemplo, se propaga rápidamente entre enfermos en condiciones poco higiénicas.



¿POR QUE NO SE CONGELAN LAS PATAS DE LOS PINGÜINOS?

ECOFISIOLOGÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Knut Schmidt-Nielsen (1915–2007)

ANTES
1845 El explorador Alexander von Humboldt explica que las plantas enfrentadas a factores ecológicos similares tienen muchos rasgos análogos.

1859 Charles Darwin defiende que los seres vivos evolucionan debido a la adaptación a unas condiciones ecológicas cambiantes.

DESPUÉS
1966 Los bioquímicos australianos Marshall Hatch y Charles Slack explican que las plantas más comunes son las de fotosíntesis más eficaz.

1984 Peter Wheeler, científico británico, propone que el bipedismo humano –el caminar sobre dos piernas– evolucionó como adaptación termorreguladora, para reducir la exposición al sol.

El principio central de la evolución darwiniana es que todos los organismos, desde las simples bacterias hasta los mamíferos complejos, se adaptan por selección natural para sobrevivir en un nicho y un hábitat determinados. La ecofisiología –inspirada por la obra de Knut Schmidt-Nielsen *Fisiología animal* (1960)– es el estudio de la anatomía de un organismo, de cómo funciona (su fisiología) y cómo se relacionan tales características con los desafíos del medio. Muestra el vínculo entre la anatomía de un animal o planta y su capacidad de supervivencia, su distribución, su abundancia y su fertilidad. La ecofisiología tiene hoy un papel importante para comprender el impacto del cambio climático tanto en ecosistemas salvajes como cultivados.



Desde un punto de vista fisiológico, no hay más agua dulce disponible en el mar que en el desierto.
Knut Schmidt-Nielsen



Regulación térmica

La ecofisiología ha revelado una serie de adaptaciones específicas para distintos medios. Los animales de regiones frías tienden a tener cuerpos mayores y patas, orejas y colas más cortas que las especies emparentadas de regiones más cálidas. Un cuerpo mayor tiene una relación superficie-masa menor, y, por tanto, pierde más lentamente el calor; y unos apéndices menores reducen la exposición al congelamiento.

En el frío más extremo, hay riesgo de que la parte inferior de las patas de un animal de sangre caliente quede pegada al suelo helado. Los mamíferos de las regiones árticas, como el buey almizclero y el oso polar, están adaptados a sus medios con un pelaje grueso para aislar las extremidades.

En la Antártida, la parte inferior de las patas de los pingüinos tiene una capa gruesa de grasa como aislante, y cuentan también con un mecanismo de intercambio de calor en las patas. La sangre caliente que

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Estequiometría ecológica 74–75

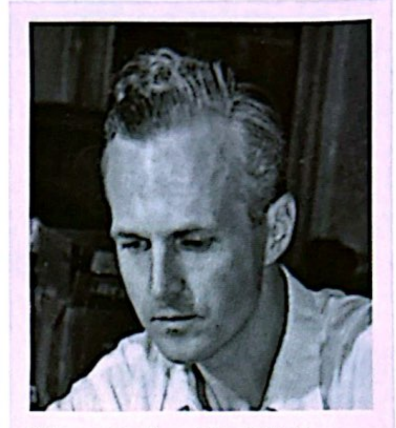
llega del cuerpo se enfría hasta casi 0 °C por efecto de la sangre enfriada procedente de las patas, que a su vez alcanza la temperatura corporal. Las gacelas africanas emplean un sistema de intercambio de calor similar para perder temperatura, enfriando la sangre que llega a la cabeza. Esto les da una ventaja sobre sus depredadores, que suelen sobrecalentarse. Los camellos tienen un sistema de intercambio de calor en la cavidad nasal, para reducir la cantidad de agua que escapa con el aliento. El aire caliente y seco inhalado capta la humedad de la cavidad nasal antes de pasar a los pulmones. El aire exhalado es mucho más frío que el aire del exterior, por lo que la humedad que contiene se condensa en la cavidad nasal, creando las condiciones de frío y humedad necesarias para refrescar la siguiente inhalación.

Desafíos futuros

Hoy día, la ecofisiología se centra cada vez más en las plantas, los hongos y los microbios. Como los animales, estos deben adaptarse para sobrevivir, y estudiarlos posibilita descubrimientos vitales para fines comerciales y de conservación. ■



Los pingüinos emperador toleran las temperaturas gélidas de la Antártida gracias al modo en que han evolucionado para adaptarse al medio.



Knut Schmidt-Nielsen

Schmidt-Nielsen (1915–2007) se crió en Trondheim (Noruega). Heredó el interés por la relación entre fisiología animal y hábitat de su abuelo, quien años antes de nacer Knut había soltado miles de alevines de platija, un pez marino, en un lago de agua dulce. Aunque prosperaron, no eran capaces de reproducirse, pues su fisiología reproductiva estaba adaptada a la vida en agua salada.

Schmidt-Nielsen estudió en la Universidad de Duke, en Carolina del Norte, desde 1954. Construyó un espacio climatizado para animales del desierto, donde estudió la anatomía de camellos, jerbos (roedores) y otras especies capaces de resistir largos periodos sin agua. También estudió el sistema respiratorio de las aves y la flotabilidad en los peces. Su *Fisiología animal* (1960) sigue siendo un clásico.

Obras principales

1960 *Fisiología animal.*
1964 *Desert animals.*
1972 *Cómo funcionan los animales.*
1984 *Scaling.*
1998 *The camel's nose: memoirs of a curious scientist.*



TODA FORMA DE VIDA ES QUIMICA

ESTEQUIOMETRÍA ECOLÓGICA

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Robert Sterner (n. 1958), **James Elser** (n. 1959)

ANTES
1840 Justus von Liebig, biólogo y químico alemán, afirma que las limitaciones a la productividad agrícola son sobre todo químicas.

1934 Alfred Redfield, oceanógrafo estadounidense, mide la proporción atómica de carbono nitrógeno y fósforo (C:N:P) en el plancton y el agua de mar, y es relativamente constante en todos los océanos. La relación de Redfield (o estequiométrica) pasa a ser la referencia para tales estudios en todos los hábitats.

DESPUÉS
2015 En su artículo «Ocean stoichiometry, global carbon, and climate», Robert Sterner señala inconsistencias en la proporción de C:N:P del fitoplancton, que absorbe más carbono atmosférico en aguas superficiales oceánicas de latitudes bajas, y ajusta su proporción en consecuencia.

Cada ser vivo, desde las minúsculas algas oceánicas hasta las imponentes secuoyas rojas, se compone de elementos químicos en proporciones variables. La estequiometría ecológica estudia el equilibrio de estos elementos y cómo cambia su proporción en las reacciones químicas. Las proporciones arrojan luz sobre cómo funciona el mundo vivo, mostrando cómo los organismos obtienen los nutrientes y otras sustancias para vivir de los recursos del medio. El campo de la estequiometría ecológica fue descrito con detalle y por vez primera por los biólogos estadounidenses Robert Sterner y James Elser, quienes, en *Ecological stoichiometry* (2002), mostraron con modelos matemáticos su aplicación a todos los niveles, desde moléculas y células hasta plantas y animales individuales, poblaciones, comunidades y ecosistemas.



Hay también diferencias estequiométricas durante el ciclo vital de organismos individuales. Los jóvenes pueden tener una composición distinta a la de los viejos [...].
Robert Sterner y James J. Elser



Elementos clave

El carbono (C), el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son los tres principales elementos analizados en los estudios ecológicos. El carbono es el elemento fundamental de la vida, y es parte importante de muchos procesos químicos; el nitrógeno es un componente básico de todas las proteínas; y el fósforo es vital para el desarrollo celular y para almacenar energía.

La proporción de C:N:P de un organismo no es necesariamente fija. Es variable en las plantas, que ajustan el equilibrio de los elementos según el entorno. La proporción de carbono en su composición puede crecer en un día muy soleado, por ejemplo, al aumentar la fotosíntesis, el proceso por el que las plantas toman dióxido de carbono del aire y usan energía solar para convertirlo en los nutrientes necesarios.

Véase también: Ecofisiología 72–73 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ El flujo de energía en los ecosistemas 138–139 ▪ Fundamentos de la ecología vegetal 167

Control de la proporción de estequiometría ecológica

Las langostas comen hierba que puede contener seis veces más carbono del que necesitan. Para lograr el equilibrio, excretan el carbono o lo exhalan como CO_2. Son útiles para los estudios por ser fáciles de criar.





CLAVE
Carbono Nitrógeno

LANGOSTAS
5:1

HIERBA
33:1

Más arriba en la cadena trófica, los animales suelen tener proporciones fijas de C:N:P, y recurren a diversos mecanismos para compensar los desequilibrios químicos que impone el entorno. Si un insecto o herbívoro ingiere demasiado carbono de su dieta vegetal, puede ajustar sus enzimas digestivas y excretarlo, almacenarlo en forma de grasa o aumentar su tasa metabólica para eliminarlo por combustión, expulsando el excedente en forma de CO_2. Sin embargo, recurrir de forma excesiva a tales mecanismos para compensar desequilibrios puede afectar a la condición física, al crecimiento o a la reproducción. Un animal que se alimenta de otros tiene menos trabajo por delante, pues la proporción de C:N:P de sus presas es muy similar a la suya. El tamaño de la población de las presas sigue determinado por las plantas del entorno, pues el alimento vegetal rico en carbono solo puede mantener una cadena trófica reducida.



Comprender nuestro mundo

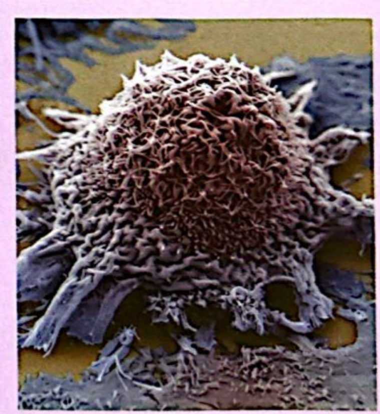
Las cadenas tróficas son un área de estudio, pero la estequiometría ecológica lo cubre prácticamente todo, junto con los vínculos intermedios. Al descubrir cómo el contenido químico de los organismos conforma su ecología, los científicos están aprendiendo a gestionar mejor los medios, y sus hallazgos pueden tener una influencia importante sobre el futuro de la vida en la Tierra. ■

La langosta del desierto *(Schistocerca gregaria)* come gran cantidad de plantas ricas en carbono para obtener el nitrógeno y el fósforo que mantengan su proporción de C:N.

Hipótesis de la tasa de crecimiento

La estequiometría se aplica hoy día al estudio del cáncer. Se están reuniendo pruebas para la hipótesis de la tasa de crecimiento, que explicaría por qué algunos tumores crecen a tasas superiores a las del resto del organismo.

Según la hipótesis, los organismos con proporciones altas de C:P (carbono : fósforo), como la mosca de la fruta, tienen más ribosomas en sus células, por lo que crecen y se reproducen más rápidamente. La mitad aproximada del fósforo de un organismo está en forma de ARN ribosómico (ARNr), presente en todas las células y encargado de crear proteínas para construir nuevas células para que el organismo crezca. Aplicando la estequiometría biológica, el equipo de James Elser mostró que los tumores de crecimiento rápido tienen un contenido en fósforo muy superior al tejido normal. Estos estudios pueden servir para controlar el crecimiento de los tumores.



El tejido pulmonar maligno (en la imagen) y el tejido canceroso del colon mostraron el mayor contenido en fósforo al estudiar la tasa de crecimiento tumoral.



EL MIEDO MISMO ES PODEROSO

EFECTOS NO CONSUNTIVOS DE LOS DEPREDADORES SOBRE SUS PRESAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Earl Werner (n. 1944)

ANTES
1966 Robert Paine, ecólogo estadounidense, lleva a cabo una serie de experimentos de campo pioneros que sirven para ilustrar los efectos decisivos de un depredador sobre la comunidad en la que vive.

1990 Los biólogos canadienses Steven Lima y Lawrence Dill analizan la toma de decisiones en organismos que corren mayor riesgo de ser depredados por otros.

DESPUÉS
2008 El biólogo y ecólogo conductual John Orrock se asocia con Earl Werner y otros para producir modelos matemáticos que expliquen los efectos no consuntivos de los depredadores.

Muchas descripciones de ecosistemas se centran en interacciones depredador-presa en las que los depredadores matan y las presas son comidas. El ecólogo estadounidense Earl Werner y otros han mostrado que la mera presencia del depredador afecta al comportamiento de la presa.

Superdepredadores aparte, todos los animales se ven abocados a un compromiso entre la necesidad de dormir, reproducirse y alimentarse y el riesgo de ser comidos. El papel letal de los depredadores es evidente, pero su papel no letal (no consuntivo) puede tener un impacto aún mayor sobre un ecosistema, pues las presas potenciales cambian su modo de vida para evitar ser cazadas.

En 1990, Werner estudió los efectos de las larvas de libélula verde



Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Mutualismos 56–59 ▪ Teoría del forrajeo óptimo 66–67



Una libélula poniendo huevos en un estanque. Las larvas son depredadores, y se ha comprobado que influyen en la conducta de sus presas, los renacuajos.

sobre los renacuajos de sapo, y observó que cuando había larvas predatorias en el acuario, los renacuajos eran menos activos, nadaban a otras partes del acuario y se metamorfoseaban en adultos con menor tamaño. Con su sola presencia, el depredador había cambiado la morfología y el comportamiento.

En 1991, Werner investigó qué ocurría cuando había más de una especie de presa en juego. A falta de depredadores, los renacuajos de las ranas toro y verdes tienen tasas de crecimiento casi idénticas. Al introducir larvas de libélula en el acuario, sin embargo, ambas especies se volvían menos activas y escogían lugares diferentes para nadar. Los renacuajos de rana toro crecían más rápido que en el acuario sin depredadores, pero los de rana verde, en cambio, comían menos y crecían más lentamente. Werner concluyó que las presas sacrificaban la necesidad de crecer lo más rápido posible para reducir el riesgo de ser cazados. Crecer más rápido requiere pasar más tiempo alimentándose, lo cual aumenta las posibilidades de ser comido por un depredador. Como la presencia de las larvas afectaba a cada especie de modo distinto, el nuevo comportamiento de la rana toro le daba una ventaja competitiva sobre la rana verde, al adquirir un tamaño mayor.

Animales terrestres

Los primeros estudios sobre efectos no consuntivos se centraron en organismos acuáticos en condiciones de laboratorio, pero ha habido ya trabajos con animales terrestres en su medio. Un trabajo de campo alemán publicado en 2018 estudió al lince y su presa, el corzo. En presencia de linces, los investigadores notaron que los corzos evitaban las zonas de alto riesgo, tanto de día como en las noches de verano, de mayor depredación nocturna. Los corzos se abstenían de visitar determinados pastos, presumiblemente por temor a ser atacados por un lince.

Donde hay depredadores, estos ejercen efectos no consuntivos, y afectan también a algunas especies sésiles (no móviles), además de a las móviles. Esto ocurre cuando ciertos competidores dominantes son desplazados por depredadores, y en su nuevo hábitat superan a otras especies en la competencia por el alimento. Por ejemplo, los peces pequeños desplazados podrían superar a las esponjas. ■

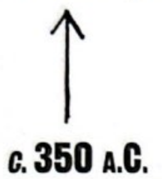


[…] las especies responden [a la depredación] con menor actividad y distinto uso del espacio.

Earl Werner



En *Historia de los animales*, **Aristóteles** agrupa a los seres vivos por **especie**, en una **escala natural** de organismos con 11 grados.



c. 350 a.C.

1665 a.C.



Micrographia, obra ricamente ilustrada de **Robert Hooke**, revela **estructuras microscópicas** a un público más amplio.

Se expone una colección privada de curiosidades de historia natural en el Museo Ashmolean, en Oxford, el **primer museo público del mundo**.



1683

1758

La décima edición de *Systema naturae*, de **Carlos Linneo**, clasifica una serie de especies de plantas y animales por el **sistema binomial**.

El **Museo de Historia Natural de Londres** abre sus puertas al público gratis. Hoy alberga 80 millones de especímenes.



1881

La diversidad de la vida ha maravillado siempre al ser humano, y ya en la pintura rupestre prehistórica de hace 30 000 años o más se celebraban los dones de la naturaleza. En la Antigua Grecia del siglo IV a.C., Aristóteles elaboró una clasificación pionera de los seres vivos en una escala natural de 11 grados, con los seres humanos y los mamíferos en la cúspide, y descendiendo por otros animales más «primitivos» hasta las plantas y los minerales. Mil años más tarde, en la Edad Media, continuaban vigentes las variaciones sobre el sistema aristotélico. Esto se debe a varios motivos: a falta de microscopios, nada se sabía de células ni microorganismos. Sin medios para la exploración subacuática, los conocimientos sobre las especies de medios acuáticos eran limitados, y, además, la mayor parte del mundo seguía siendo desconocida para los estudiosos occidentales.

A tono con las concepciones prevalecientes de la Iglesia católica, el mundo natural se consideraba estático e invariable.

Una era de descubrimientos

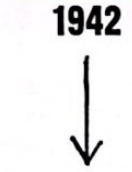
La era de las grandes expediciones reveló regiones hasta entonces desconocidas, con animales y plantas propios. En su *Historia de los animales* (1551–1558), el médico y naturalista Conrad Gessner incluyó algunos hallazgos del Nuevo Mundo y del Lejano Oriente, además de basarse en las fuentes clásicas. La obra, en cinco volúmenes, reflejaba su división de los animales en: mamíferos; reptiles y anfibios; aves; peces y animales acuáticos; y serpientes y escorpiones.

La invención del microscopio tuvo también un impacto considerable. El inglés Robert Hooke adoptó enseguida esta nueva tecnología, y su obra *Micrographia* (1665) inspiró a otros a hacer igual. Hooke observó especímenes con cincuenta aumentos sobre su tamaño real, dibujó meticulosamente la vida microscópica, y acuñó el término «célula» en su acepción moderna, al examinar fibras vegetales. Hooke también propuso un origen vivo para los fragmentos fósiles hallados en las rocas.

Clasificar la variedad

El equivalente botánico de la obra anterior de Gessner fue *History of plants* (1686–1704), del vicario inglés John Ray, que incluía unas 18 000 especies en tres grandes volúmenes. Ray creó también una definición de especie, al afirmar que «una especie nunca brota de la semilla de otra». El padre de la taxonomía, el botánico

1942



Ernst Mayr desarrolla el **concepto de especie biológica**, que define la especie en función de la capacidad de reproducirse entre sí de sus miembros.

1977

Carl Woese establece una nueva categoría de organismos, los **procariotas**.

1988



El concepto de **«puntos calientes de biodiversidad»**, de **Norman Myers**, identifica diez puntos calientes donde deberían preservarse especies raras.



1988



Edward O. Wilson acuña el término **«biodiversidad»**, e identifica las **amenazas humanas** clave para la misma.

2018



La **lista roja de la UICN** muestra que más de **26 000 especies** –más del 27 % de las consideradas– están en peligro de **extinción**.

sueco Carlos Linneo, publicó *Systema naturae* en 1735, pero fue la décima edición de 1758 la que fundó la nomenclatura zoológica moderna. Dos volúmenes de la obra de Linneo están dedicados a las plantas y los animales, que dividió en clases, órdenes, géneros y especies. El sistema binomial, en el que cada especie recibe un nombre genérico seguido del nombre específico, sigue vigente hoy. Linneo escribió también un tercer volumen sobre rocas, minerales y fósiles.

Conceptos de especie

Desarrollando la teoría de la evolución por selección natural de Darwin, el biólogo evolutivo germano-estadounidense Ernst Mayr asentó el concepto biológico de especie en *Systematics and the origin of species* (1942), precisando que una especie no es un mero grupo de individuos morfológicamente semejantes, sino una población capaz de reproducirse solo entre sí. Mayr explicaba cómo un grupo dentro de una especie, si queda aislado del resto de la población, puede empezar a diferenciarse de esta, y cómo, con el tiempo, y por deriva genética y selección natural, puede dar lugar a especies nuevas.

Avances tecnológicos modernos como el microscopio electrónico y el análisis del ADN mitocondrial han aportado información abundante (y alguna sorprendente) acerca del número de especies y de las relaciones entre ellas. En 1966, en un esfuerzo por reflejar la intrincada estructura de la evolución, el entomólogo alemán Willi Hennig propuso un nuevo sistema taxonómico de clados, grupos de organismos basados en un antepasado común. En la década de 1970, el biólogo estadounidense Carl Woese clasificó toda la vida en tres nuevos dominios. Hoy se han descrito alrededor de 1 740 000 especies de plantas y animales, pero las estimaciones del total varían entre los dos millones y el billón.

La amenaza de la diversidad

A finales del siglo XX, sin embargo, en un contexto de conocimiento creciente de la escala y el papel crítico de la biodiversidad –y de cómo la evolución destruye especies, además de crearlas–, el ecólogo estadounidense Edward Wilson y otros hicieron consciente al mundo de que la actividad humana estaba causando una rápida aceleración de la tasa de extinción. Se están proponiendo muchas políticas para corregirlo, entre ellas la protección de los puntos calientes de la biodiversidad. ■



TODAS LAS COSAS DE LA NATURALEZA TIENEN ALGO DE MARAVILLOSO

CLASIFICACIÓN DE LOS SERES VIVOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Aristóteles (*c.* 384–322 a.C.)

ANTES
***C.* 1500 a.C.** Los antiguos egipcios identifican diversas propiedades de las plantas.

DESPUÉS
Siglos VIII y IX Los estudiosos islámicos de la dinastía omeya y el califato abasí traducen al árabe numerosas obras de Aristóteles.

1551–1558 En *Historia animalium*, Conrad Gessner clasifica los animales del mundo en cinco grupos básicos.

1682 John Ray publica *History of plants*, que incluye más de 18 000 especies.

1735 Carlos Linneo crea el sistema de nomenclatura binomial, primera clasificación coherente de los seres vivos, y con él nombra a todas las especies de su *Systema naturae*.

Desde los inicios de la historia escrita se ha tratado de identificar a los seres vivos en función de su utilidad. Las pinturas egipcias de *c.* 1500 a.C. muestran, por ejemplo, que se conocían las propiedades medicinales de muchas plantas. *Historia de los animales*, escrito en el siglo IV a.C. por el filósofo y científico Aristóteles, incluía la primera propuesta seria de clasificación de los seres vivos, basada en el estudio de su anatomía, sus ciclos vitales y su comportamiento.

Rasgos clasificatorios

Aristóteles dividió los seres vivos en plantas y animales, y agrupó unas quinientas especies animales en función de rasgos anatómicos obvios, como la presencia o ausencia de sangre, ser de sangre caliente o fría, tener cuatro o más patas y parir crías vivas o poner huevos. También consideró el que los animales vivieran en el mar, en tierra o volaran por el aire. Los nombres que usó Aristóteles para agrupar organismos se tradujeron posteriormente al latín como *genus* y *species*: género y especie, los términos que usan los taxónomos hasta hoy.

Aristóteles dispuso los animales en una *scala naturae* de once grados, diferenciados por cómo nacen. Los de los grados superiores paren crías vivas, calientes y húmedas; las de los inferiores ponen huevos fríos y secos. Los seres humanos estaban en la cúspide, seguidos en orden descendente por los tetrápodos vivíparos, cetáceos, aves y tetrápodos ovíparos. Aristóteles situó los minerales en el extremo inferior de la escala, por la que ascendían plantas, gusanos, esponjas, insectos con fase larvaria y animales de concha dura.

El sistema de clasificación de Aristóteles era rudimentario, pero se basaba en gran medida en obser-



Quien tenga por indigna la tarea de examinar el resto del reino animal debería sentir la misma escasa estima por el estudio del hombre.
Aristóteles



Véase también: El medio microbiológico 84–85 ▪ Un sistema para identificar todos los seres vivos 86–87 ▪ El concepto biológico de especie 88–89 ▪ Microbiología 102–103 ▪ Comportamiento animal 116–117 ▪ Biogeografía de islas 144–149



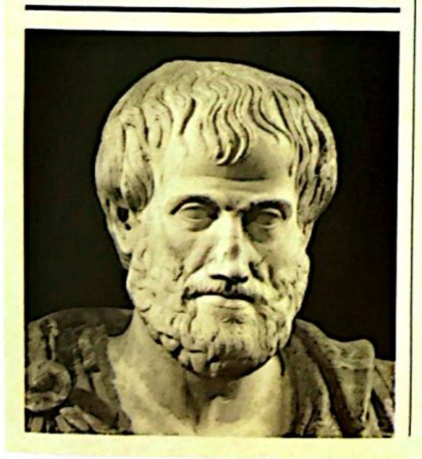
Un pulpo perfectamente camuflado en su entorno. La capacidad de los pulpos para cambiar de color fue una de las muchas observaciones acertadas de Aristóteles.

vaciones de primera mano, muchas de ellas realizadas en la isla de Lesbos. Aristóteles registró fenómenos nunca antes descritos, como que las crías de tiburón se desarrollaban en el cuerpo de la madre, que los peces gato macho protegen los huevos, y que los pulpos cambian de color. La mayoría de sus observaciones fueron acertadas, y algunas no se confirmaron hasta siglos después.

La cadena de los seres

A pesar de sus limitaciones, el método de clasificación de Aristóteles tuvo una influencia enorme sobre todos los intentos posteriores de agrupar animales y plantas hasta el siglo XVIII. La cristiandad medieval hizo de la *scala naturae* una «cadena de los seres», con Dios en la cima de una jerarquía estricta, el hombre y los animales debajo, y las plantas en la base. El médico suizo Conrad Gessner escribió el primer registro moderno de animales, *Historia animalium*, a mediados del siglo XVI. Esta obra monumental, de un total de cinco volúmenes, se basaba en fuentes clásicas, pero además incluía especies descubiertas recientemente en Asia oriental. Abarcaba los principales grupos de animales tal como los entendía Gessner: cuadrúpedos vivíparos (mamíferos); cuadrúpedos ovíparos (reptiles y anfibios); aves; peces y animales acuáticos; y serpientes y escorpiones. En 1682, el naturalista inglés John Ray publicó un registro equivalente para la botánica, *History of plants*. Poco más de cincuenta años después, *Systema naturae*, de Carlos Linneo, transformaría completamente la clasificación de los seres vivos. ■

Aristóteles



Aristóteles nació en Macedonia, reino vecino de la antigua Grecia. Sus padres murieron siendo él joven, y fue criado por un tutor. A los diecisiete o dieciocho años de edad fue enviado a la Academia de Platón, en Atenas, donde estudió durante veinte años, y escribió sobre física, biología, zoología, política, economía, gobierno, poesía y música. Más tarde vivió en la isla de Lesbos con su discípulo Teofrasto, para estudiar la botánica y zoología del lugar. Gran parte de *Historia de los animales* se basó en las observaciones realizadas allí.

Aristóteles fue maestro de Tolomeo y de Alejandro Magno, y en 335 a.C. fundó su propia escuela, el Liceo, en Atenas. Tras la muerte de Alejandro Magno, en 322 a.C., Aristóteles huyó de la ciudad, y murió en la isla de Eubea el mismo año.

Obras principales

Siglo IV a.C.
Historia de los animales.
Partes de los animales.
Generación de los animales.
Movimiento de los animales.
Progresión de los animales.



CON LA AYUDA DEL MICROSCOPIO, NADA ESCAPA AL ESTUDIO

EL MEDIO MICROBIOLÓGICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Robert Hooke (1635–1703)

ANTES
1267 El filósofo inglés Roger Bacon escribe sobre la óptica para observar «las partículas de polvo más minúsculas» en el quinto volumen de su *Opus majus*.

1661 Los dibujos microscópicos de Christopher Wren, arquitecto inglés, impresionan a Carlos II de Inglaterra, quien encarga otros a Robert Hooke.

DESPUÉS
1683 El científico neerlandés Antonie van Leeuwenhoek observa bacterias y protozoos al microscopio. La Real Sociedad de Londres publica sus hallazgos.

1798 Edward Jenner, médico y científico inglés, desarrolla la primera vacuna del mundo (para la viruela) y publica *Una investigación sobre las causas y los efectos de las «variolae vaccinae»*.

Los lectores del siglo xvii que pudieron hojear las páginas de *Micrographia* tuvieron que sentir asombro. En esta obra seminal de 1665 del científico inglés Robert Hooke había muchas ilustraciones detalladas de estructuras hasta entonces ocultas al ojo humano debido a su minúsculo tamaño. El microscopio de Hooke era de cincuenta aumentos, pero la precisión de sus dibujos debe mucho a su enfoque meticuloso: Hooke realizaba numerosos esbozos desde distintos ángulos, antes de combinarlos en una sola imagen.



[…] en cada pequeña partícula […] contemplamos ahora una variedad tan grande de criaturas como antes podíamos calcular para el universo entero.
Robert Hooke



Aunque no hay consenso sobre quién desarrolló los primeros microscopios, no hay duda de que se empleaban ya en la década de 1660. Los primeros eran poco fiables, debido a la dificultad de fabricar lentes, y los científicos tenían que usar recursos creativos para compensarlo. Al principio, Hooke tenía dificultades para ver claramente sus especímenes, y por ello inventó una fuente de luz mejorada, el escotoscopio.

El libro de Hooke es más que una mera representación precisa de lo que vio a través de la lente, pues también teoriza sobre lo que revelan las imágenes sobre el funcionamiento de los organismos observados. Por ejemplo, al observar una lámina de corcho, Hooke vio un patrón de colmena, a cuyos elementos llamó células, el término que se sigue utilizando en la actualidad para organismos de todas clases.

Maravillas microscópicas

Micrographia animó a muchos otros científicos a estudiar el mundo microscópico. Siguiendo las notas y diagramas del libro de Hooke, el científico neerlandés Antonie van Leeuwenhoek pudo construir sus

Véase también: Clasificación de los seres vivos 82–83 ▪ Un sistema para identificar todos los seres vivos 86–87 ▪ Microbiología 102–103 ▪ Termorregulación en los insectos 126–127

propios microscopios, con los que superó los doscientos aumentos. Van Leeuwenhoek examinó muestras de agua de lluvia y agua estancada, y le maravilló la multitud de vida que allí vio. Identificó protozoos unicelulares, a los que llamó «animálculos», y descubrió las bacterias. También realizó muchas observaciones de la anatomía humana y animal, entre ellas, células sanguíneas y espermatozoides.

Mientras Van Leeuwenhoek estudiaba muestras de agua, su compatriota Jan Swammerdam observó insectos con su propio microscopio, publicó registros muy detallados de insectos de todas clases y descubrió mucho sobre su anatomía. La obra más influyente de Swammerdam fue *Ephemeri vita* (1675), que recogía con gran detalle el ciclo vital de las efímeras.

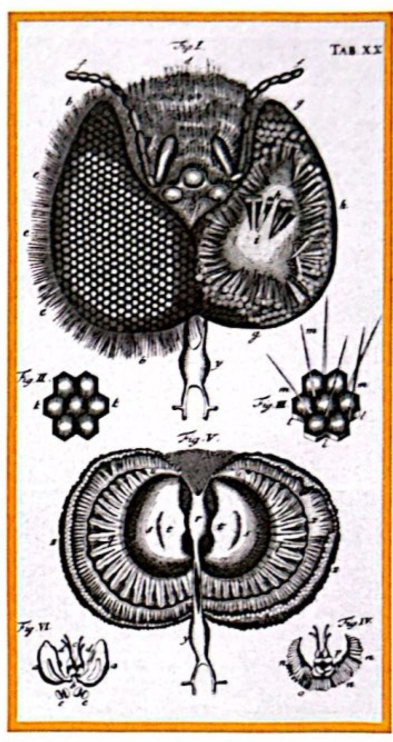
En Inglaterra, Nehemiah Grew examinó una extensa gama de plantas al microscopio, y fue el primero en identificar las flores como órganos sexuales. En *The anatomy of plants* (1682), Grew nombró el estambre como órgano masculino y el pistilo como órgano femenino. Grew observó también granos de polen, y percibió que los transportaban las abejas.

Desde los inicios de la microscopía, los aparatos no han dejado de ganar en sofisticación. El microscopio electrónico, usado por primera vez en 1931, emplea haces de electrones en lugar de luz para revelar los objetos, permitiendo aumentos de hasta un millón, 600 veces más que la mayoría de los microscopios ópticos. ■



[Micrographia] es el libro más ingenioso que nunca leí en mi vida.
Samuel Pepys
Diarista inglés





El ojo compuesto y el cerebro de una abeja, dibujados por Jan Swammerdam y publicados en *A treatise on the history of bees*, muestran el exterior del ojo (izda.) y su disección (dcha.), con el corte transversal del cerebro abajo.

Robert Hooke



Nacido en la isla de Wight (Inglaterra), Hooke se interesó desde muy joven por la ciencia. Gracias a una herencia, asistió a la Westminster School, donde destacó y obtuvo plaza en la Universidad de Oxford, en la que trabajó con los filósofos naturales John Wilkins y Robert Boyle.

En 1662, fue el primer director de experimentación de la Royal Society de Londres, y, en 1665, fue profesor de física del Gresham College.

Como muchos científicos de su tiempo, Hooke tenía intereses muy diversos. Entre sus logros están sus esbozos tempranos de la teoría ondulatoria de la luz, la construcción de algunos de los primeros telescopios y la formulación de la ley de Hooke. Fue también un arquitecto respetado, actividad que lo convirtió en un hombre rico.

Obras principales

1665 *Micrographia.*
1674 *An attempt to prove the motion of the Earth.*
1676 *A description of helioscopes and some other instruments.*



SI SE IGNORA EL NOMBRE DE LAS COSAS, SE PIERDE EL CONOCIMIENTO DE ELLAS

UN SISTEMA PARA IDENTIFICAR TODOS LOS SERES VIVOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Carlos Linneo (1707–1778)

ANTES
1682 El botánico inglés John Ray propone la división del reino vegetal en árboles y dos familias de herbáceas.

1694 El botánico francés Joseph Pitton de Tournefort publica *Eléments de botanique*, libro hermosamente ilustrado que se convertirá en la referencia clasificatoria botánica durante medio siglo.

DESPUÉS
1957 Sir Julian Huxley es el primero en aplicar el término «clado» a un antepasado común y todos sus descendientes.

1969 Robert Whittaker, ecólogo estadounidense, defiende una clasificación de la vida en cinco reinos: Monera, Protista, Fungi, Plantae y Animalia.

Antes del siglo XVIII, no había un sistema coherente para nombrar animales y plantas, y a menudo los botánicos y zoólogos no sabían si estaban considerando el mismo ser vivo. Para resolver el problema, el botánico sueco Carlos Linneo inventó un sistema revolucionario que sigue vigente en la actualidad. A Linneo se le conoce como el padre de la taxonomía, la ciencia de nombrar y clasificar los seres vivos.

Linneo dividió los reinos tanto vegetal como animal en clases, órdenes, géneros y especies. Los organismos se situaban en estos niveles sobre la base de rasgos compartidos, tales como la semejanza de las partes del cuerpo, el tamaño, la forma y los métodos para alimentarse. Linneo creó también un sistema binomial (de dos nombres) para cada especie.

Los inicios

Ya en 1730, siendo aún alumno, Linneo empezó a encontrar inconveniente el sistema de clasificación de plantas desarrollado más de treinta años antes por Joseph Pitton de Tournefort, y consideró necesario analizar más detenidamente las características de cada especie

El **trabajo cooperativo** es vital para el progreso del **conocimiento científico**.

→ Para **trabajar juntos** desde lugares lejanos, los científicos necesitan **nombres precisos**.

→ Los **malentendidos** causan **discrepancias** en el conocimiento científico.

→ **Si se ignora el nombre de las cosas, se pierde el conocimiento de ellas.**

Véase también: Clasificación de los seres vivos 82–83 ▪ El concepto biológico de especie 88–89 ▪ Una visión moderna de la diversidad 90–91



En las ciencias naturales, la observación ha de confirmar los principios de la verdad.
Carlos Linneo

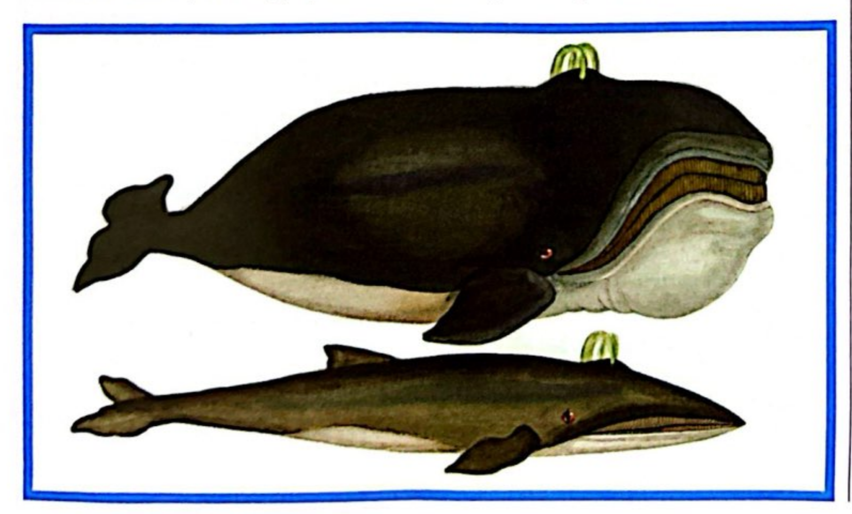


para construir un sistema taxonómico más riguroso. En 1732, Linneo participó en una expedición a Laponia, donde reunió unas cien especies no identificadas. Estas conformaron la base de su libro *Flora lapponica*, donde expuso por primera vez sus ideas sobre la clasificación de plantas.

Linneo escribió sobre su propuesta de una nueva clasificación jerárquica de las plantas tres años más tarde, en *Systema naturae*, y de nuevo en *Species plantarum*, de 1753, probablemente su mejor obra, y que incluía 7300 especies. Hasta entonces, las plantas se conocían por nombres largos y poco prácticos, como, por ejemplo, *Plantago foliis ovato-lanceolatis pubescentibus, spica cylindrica, scapo tereti*. Linneo llamó a esta planta *Plantago media*, suficiente para identificarla. Además de conciso, el sistema linneano expresa la relación entre las especies.

Desarrollos posteriores

Linneo siguió ampliando *Systema naturae*, cuya décima edición (1758) fue el punto de partida de la clasificación moderna. Fue Linneo quien propuso que los seres humanos pertenecían a la familia de los primates. Mucho más adelante, con la ayuda de la teoría de la evolución por selección natural de Charles Darwin, los biólogos aceptaron que la clasificación debe reflejar el parentesco, lo cual desembocaría en la metodología llamada cladística. ■



Las ballenas fueron una vez consideradas peces, y eran clasificadas como tales en una edición temprana de *Systema naturae*. Solo después se comprendió que son mamíferos.

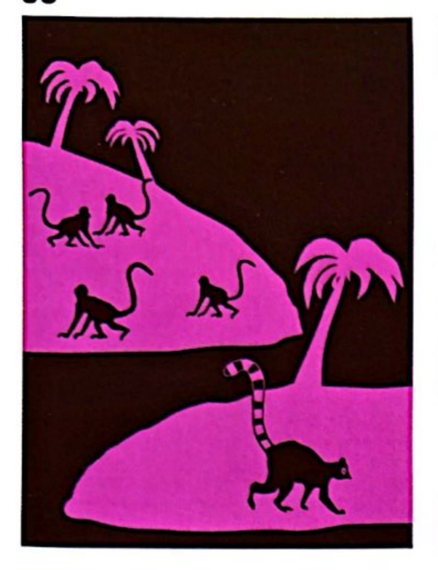


Carlos Linneo

Nacido en el sur rural de Suecia, Linneo se educó en la Universidad de Uppsala, donde empezó a enseñar botánica en 1730. Pasó tres años en los Países Bajos, y al regresar a Suecia repartió su tiempo entre la enseñanza, la escritura y las expediciones en busca de plantas. Diecisiete de sus alumnos de Uppsala emprendieron expediciones por todo el mundo. Linneo fue amigo de Anders Celsius, el inventor de la escala de temperatura centígrada. Tras la muerte de su amigo, Linneo invirtió la escala, de manera que el punto de congelación fuera 0 °C y el de ebullición 100 °C. Fue celebrado como príncipe de los botánicos, y el filósofo Rousseau dijo de él: «No conozco hombre más grande sobre la Tierra». Linneo está enterrado en la catedral de Uppsala; sus restos constituyen el espécimen tipo –el que representa a una especie– para *Homo sapiens*.

Obras principales

1735 *Systema naturae.*
1737 *Flora lapponica.*
1751 *Philosophia botanica.*
1753 *Species plantarum.*



«REPRODUCTIVAMENTE AISLADA» SON LAS PALABRAS CLAVE

EL CONCEPTO BIOLÓGICO DE ESPECIE

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Ernst Mayr (1904–2005)

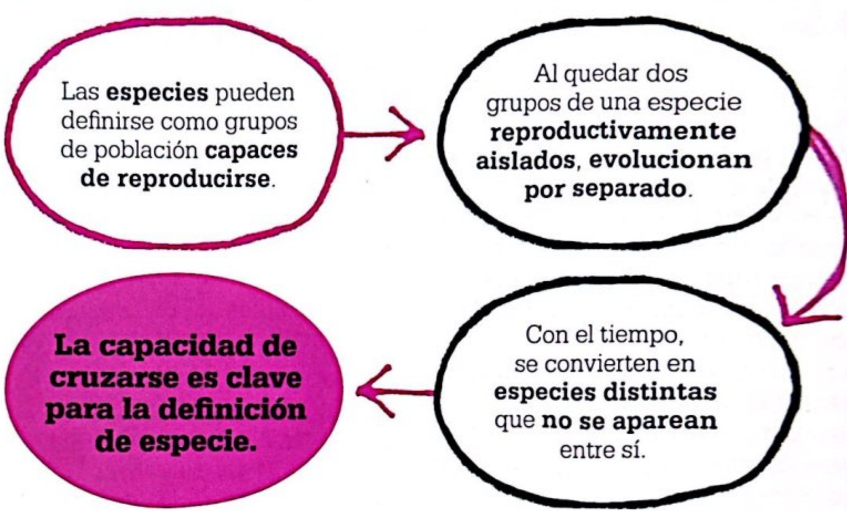
ANTES
1686 El naturalista John Ray define las especies de plantas y animales como procedentes de la misma semilla.

1859 *El origen de las especies*, de Charles Darwin, presenta la idea de que las especies evolucionan por selección natural.

DESPUÉS
1976 *El gen egoísta*, de Richard Dawkins, populariza la evolución centrada en el gen, o selección natural a nivel genético.

1995 *El pico del pinzón*, de Jonathan Weiner, detalla el trabajo de los biólogos Peter y Rosemary Grant en las Galápagos.

2007 Massimo Pigliucci y Gerd B. Müller hablan de «eco-evo-devo» para mostrar cómo la ecología es un factor que afecta a la evolución.



A principios del siglo xx se aceptaba que podían evolucionar múltiples especies a partir de un antepasado común. No estaba claro, sin embargo, cómo tenía lugar este proceso, y de hecho se debatía el significado exacto de «especie». En 1942, el biólogo evolutivo Ernst Mayr propuso una nueva definición: grupos o poblaciones naturales que pueden cruzarse entre sí pero están reproductivamente aislados de otros grupos afines.

Lo que esto significa es que dos poblaciones de la misma especie que viven en la misma zona pueden llegar a quedar separados por la geografía, la elección de pareja, las estrategias alimentarias u otros factores, y luego empezar a cambiar por selección natural o deriva genética. Con el tiempo, el resultado de esta separación inicial son dos especies distintas que no pueden cruzarse entre sí. Este tipo de especiación es habitual en poblaciones pequeñas de animales de islas remotas.

Diferencias clave

El concepto biológico de especie se centra principalmente en la capaci-

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ La función del ADN 34–37 ▪ El gen egoísta 38–39 ▪ El principio de exclusión competitiva 52–53

dad de cruzarse entre sí de los organismos. Dos organismos pueden tener el mismo aspecto y vivir en el mismo lugar, pero eso no significa necesariamente que sean de la misma especie.

Por ejemplo, el turpial gorjeador *(Sturnella neglecta)* y el turpial oriental *(Sturnella magna)* tienen un aspecto similar, y sus respectivas distribuciones geográficas se solapan; sin embargo, han evolucionado hasta tener cantos diferentes. Este hecho impide que se apareen, y hace de ellas dos especies distintas.

También se da el caso de miembros de la misma especie que tienen un aspecto muy diferente, pero que, al poder aparearse y reproducirse, continúan considerándose de la misma especie. El ejemplo más evidente es el del perro doméstico *(Canis familiaris)*, una especie en la que hay grandes diferencias entre individuos. Es igualmente evidente, sin embargo, que las diversas razas pueden cruzarse unas con otras, y, por tanto, pertenecen a la misma especie.



Han evolucionado,
y evolucionan hoy,
formas sin fin de lo más
hermoso y maravilloso.
Charles Darwin

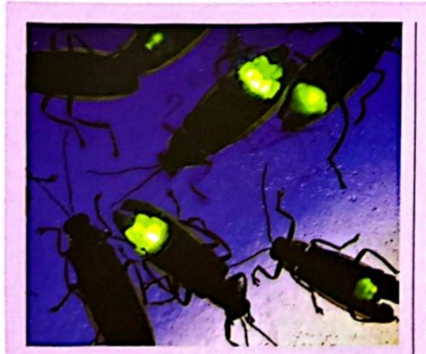



Permutaciones complejas

Según el concepto biológico de especie, la compatibilidad reproductiva es fundamental para la definición de especie. Por sí sola, la separación geográfica no impide reproducirse entre sí a los miembros de una especie. Es la divergencia evolutiva –como el canto nupcial distinto del turpial gorjeador y del oriental– el impedimento para entrecruzarse.

El concepto biológico de especie no es aplicable a organismos asexuales, como las bacterias y varias especies de lagartijas cola de látigo. Asimismo, en ocasiones, dos especies animales distintas pueden aparearse y tener descendencia, como en el caso de la yegua *(Equus ferus caballus)* y el burro *(Equus africanus asinus)*, que juntos producen un híbrido, la mula. Las mulas son, por lo general, incapaces de reproducirse, y, por tanto, el caballo y el burro siguen siendo especies distintas. Otro ejemplo es el ligre, híbrido criado en zoológicos de tigresa y león.

Dichas anomalías apuntan a la complejidad de definir lo que es una especie. El concepto biológico de especie continúa siendo el más aceptado, pero ahora los científicos están considerando la idea de genes compartidos y analizando secuencias de ADN. Hasta hoy no se ha dado con una única definición aplicable a todas las especies conocidas, y parece improbable que ocurra tal cosa. A falta de modelos mejores, el concepto biológico de especie de Mayr constituye un modo extremadamente útil de concebir las especies y la evolución. ■



Las luciérnagas macho, ejemplo de especie tipológica, emiten un patrón de destellos para atraer hembras, que reconocen el código de la especie y responden si desean aparearse.

Conceptos alternativos de especie

Aunque la idea de Mayr sobre la especiación biológica sea la definición más común de especie y explica cómo evolucionan, está lejos de ser la única. De hecho, existen más de veinte conceptos de especie reconocidos, dispuestos en dos grandes grupos, según su enfoque tipológico o evolutivo. Los conceptos tipológicos se basan en la idea de que una población de individuos del mismo tipo –o que comparten la misma serie de características– constituye una especie. Estas características pueden ser genéticas, como las secuencias de bases de ADN o ARN, o fenotípicas, tales como el tamaño de determinadas partes del cuerpo o marcas particulares, como la disposición de las manchas en las alas de un insecto. El concepto evolutivo se basa en el linaje, y se considera que forman una especie los organismos que comparten linaje desde que la especie se separó de otra hasta su extinción, o hasta una nueva separación y creación de una especie nueva.



LOS ORGANISMOS SE AGRUPAN CLARAMENTE EN VARIOS REINOS PRIMARIOS

UNA VISIÓN MODERNA DE LA DIVERSIDAD

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Carl Woese (1928–2012)

ANTES
1758 En la 10.ª edición de *Systema naturae*, Linneo clasifica la vida en dos reinos: animales y plantas.

1937 El biólogo francés Edouard Chatton divide la vida en procariotas (bacterias) y eucariotas (organismos con células complejas).

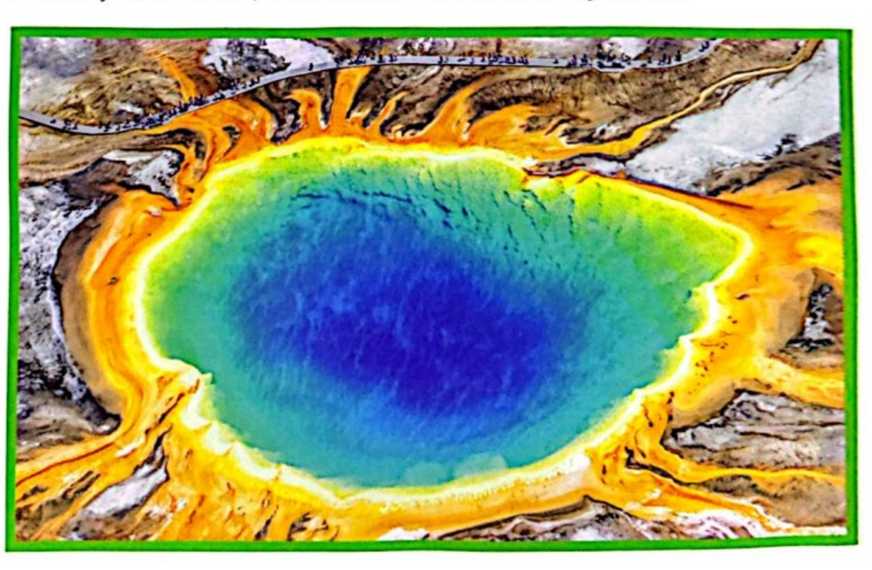
1966 El biólogo alemán Willi Hennig establece un sistema de clasificación basado en clados, grupos de organismos basados en un antepasado común.

1969 Robert Whittaker, ecólogo estadounidense, divide la vida en cinco reinos: bacterias, protistas, hongos, plantas y animales.

DESPUÉS
2017 Por consenso entre biólogos, se acepta clasificar la vida en siete reinos.

Antes de que los biólogos tuvieran el equipo y las técnicas necesarios para examinar la estructura microscópica de los seres vivos, la vida se dividía simplemente en animales y plantas. En el siglo XX, los microscopios mejorados revelaron diferencias más profundas y, de otro modo, invisibles. En la década de 1960, desarrollando la idea propuesta por Edouard Chatton en la de 1930, surgió la necesidad de una nueva división: entre procariotas (como las bacterias, con células simples sin núcleo) y eucariotas (como animales y plantas, con células mayores y más complejas).

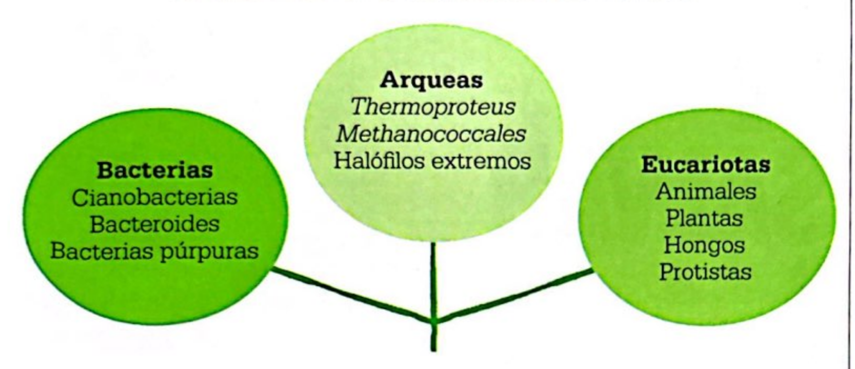
En la década de 1970, el biólogo estadounidense Carl Woese mantuvo que este sistema tampoco daba cuenta de la diversidad observada entre los microbios, los seres vivos de menor tamaño. Woese se centró en los ribosomas –orgánulos diminutos que necesitan todas las célu-



Arqueas dependientes del azufre prosperan en los pozos geotérmicos del Parque de Yellowstone (EE UU), en condiciones que matarían a la mayoría de los demás organismos.

Véase también: Primeras teorías de la evolución 20–21 ▪ Evolución por selección natural 24–31 ▪ Un sistema para identificar todos los seres vivos 86–87

El árbol de tres dominios de Woese



Según Carl Woese, todos los organismos pueden dividirse en tres categorías o «dominios» principales. Esta división se basa en semejanzas en la estructura ribosómica presente en las células de los organismos de cada dominio.

las para fabricar proteínas–, y creó el sistema de los tres dominios, una nueva perspectiva de las ramas del «árbol de la vida» de la evolución de Darwin. Woese halló grandes diferencias en la composición química ribosómica entre microbios, por ejemplo al descubrir un grupo tan lejano de otros procariotas como lo están las bacterias de los seres humanos.

Revisando el árbol de la vida

El tercer dominio de organismos, las arqueas, es superficialmente similar a las bacterias, pero tiene ciertas características extrañas. Muchas prosperan en medios extremos, y algunas –rasgo único entre los seres vivos– generan metano en lugares privados de oxígeno, como el sedimento marino profundo, o en las cavidades digestivas cálidas de herbívoros flatulentos y que emiten eructos. Otras arqueas viven en lagos diez veces más salinos que el mar, o en pozos geotérmicos calientes y ácidos donde ningún otro ser vivo sobreviviría.

Una década antes de que Woese propusiera su teoría, Robert H. Whittaker reconoció a animales, plantas y hongos como reinos separados de los eucariotas, y situó a los restantes eucariotas en el reino de los protistas, con las bacterias como quinto reino. El reino protista de Whittaker incluía organismos eucariotas como las amebas, que no encajaban en las otras categorías. Algunos protistas eran más próximos a los animales, otros, a las plantas, y otros, ni a unos ni a otras. No encajaban en el esquema del árbol de la vida, en el que los clados –grupos de organismos con un antepasado común– surgen como ramas de una bifurcación anterior.

Woese quería lograr un sistema de clasificación que reflejara la complejidad de la evolución, con ramas principales del árbol de la vida partiéndose en ramas menores, y ramitas aún menores rematadas por hojas, que representarían cada especie individual. En el futuro, el complejo árbol de la vida podría revelar nuevas categorías evolutivas. ▪

Un reino propio

Durante la mayor parte de la historia de la biología se supuso que los hongos eran plantas, y hasta el gran clasificador Linneo los incluyó en el reino Plantae. La diferencia no se empezó a comprender hasta que hubo microscopios de aumentos suficientes. Hoy se sabe que la quitina, carbohidrato complejo componente de las paredes celulares de los hongos, no se encuentra en las plantas. Además, los hongos fabrican alimento digiriendo material en descomposición; mientras que las plantas lo hacen por fotosíntesis.

Los análisis de ADN sitúan a los hongos lejos de las plantas en el árbol de la vida. De hecho, genéticamente, los hongos se hallan más cerca de la rama de la que surgieron los animales. Los mismos estudios muestran que ciertos mohos acuáticos –clasificados tradicionalmente como hongos– no están emparentados con los hongos, y también que algunos microbios patógenos son hongos que han evolucionado hasta convertirse en parásitos microscópicos.



Los hongos, como este hongo de gelatina sobre un árbol caído, ya no se clasifican como plantas. Genéticamente son más próximos a los animales.

SALVAD LA BIOSFERA Y PODREIS SALVAR EL MUNDO

ACTIVIDAD HUMANA Y BIODIVERSIDAD

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Edward O. Wilson (n. 1929)

ANTES
1993 La ONU declara el 29 de diciembre Día Internacional de la Diversidad Biológica.

1996 *The song of the dodo*, del estadounidense David Quammen, explora la naturaleza de la evolución y la extinción en hábitats cada vez más fragmentados.

DESPUÉS
2014 *La sexta extinción*, de la periodista medioambiental Elizabeth Kolbert, muestra cómo los seres humanos están causando la sexta extinción masiva de especies.

2016 Edward Wilson propone que se puede salvar la Tierra dedicando la mitad de ella a la naturaleza.

La biodiversidad es la variedad de la vida en la Tierra, en todas sus formas y a todos los niveles, desde genes hasta microbios, y desde seres humanos hasta todas las demás especies, incluidas las aún no descubiertas. Los humanos dependen de la biodiversidad para obtener alimento, combustible, refugio, medicamentos y productos de belleza y placer. Para otras especies, están en juego también los nutrientes, la distribución de semillas, la polinización y el éxito reproductivo. Ningún ser vivo puede sobrevivir sin la biodiversidad.

Los ecólogos han detectado amenazas crecientes a la biodiversidad, muchas causadas por la actividad humana. La tasa actual de extinción

Véase también: Puntos calientes de la biodiversidad 96–97 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Biogeografía de islas 144–149 ▪ Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157 ▪ Biomas 206–209 ▪ Deforestación 254–259 ▪ Sobrepesca 266–269

Efectos de la actividad humana sobre la biodiversidad

Las cinco actividades humanas que más gravemente afectan a la biodiversidad de la Tierra están representadas en el acrónimo HIPPO creado por Edward Wilson, cuyo orden refleja la gravedad relativa de cada una de ellas.





de especies se estima que es unas mil veces mayor que antes de 1800, cuando la humanidad empezó a dominar el planeta. El término «biodiversidad» lo usó por primera vez, en 1988, el biólogo estadounidense Edward O. Wilson, al que llamaron «padre de la biodiversidad». Wilson destacó cinco amenazas clave para la diversidad, agrupadas en el acrónimo inglés HIPPO: destrucción de hábitat; especies invasivas; contaminación; población humana; y sobreexplotación por caza excesiva y sobrepesca.

Destructores de hábitat

Hay más de 25 000 especies amenazadas en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). El 85 % de estas está en peligro por la pérdida de hábitat, cuya destrucción puede deberse a factores naturales como incendios o inundaciones, pero mucho más habitualmente se debe a la expansión de terrenos de cultivo, la explotación maderera y el sobrepastoreo. La deforestación, en particular, ha contribuido enormemente a la pérdida de hábitat, al haberse despejado la mitad de la superficie de bosque del mundo.

Algunos hábitats no se destruyen, sino que se fragmentan o dividen en unidades aisladas por intervenciones tales como la construcción de presas o trasvases. La fragmentación del hábitat es especialmente peligrosa para los animales migratorios, que pueden no encontrar donde alimentarse o descansar en las rutas acostumbradas. La introducción accidental o deliberada de nuevas especies también perturba a las especies nativas y sus ecosistemas. Las especies invasoras pueden amenazar el suministro de alimentos u otros recursos de las nativas, transmitir enfermedades y suponer amenazas predatorias. La serpiente arbórea marrón, por ejemplo, llegada por accidente a Guam en un barco de carga, causó la extirpación (extinción de una especie en un área particular) de diez de las once especies de aves nativas.

Contaminación del aire y el agua

Toda contaminación amenaza la biodiversidad, pero las del aire y del agua son especialmente dañinas. Quemar combustibles fósiles, por ejemplo, emite los gases residuales dióxido de azufre y óxido de nitrógeno, que vuelven a caer en forma de lluvia ácida, la cual acidifica el agua y el suelo y afecta a la salud y la biodiversidad de los ecosistemas. Las emisiones de ozono a nivel del suelo dañan la membrana celular de las plantas, »



Es esa gama de la biodiversidad lo que debemos cuidar, toda ella, y no solo una o dos estrellas.

David Attenborough

Divulgador y naturalista británico





Edward O. Wilson

Nacido en Alabama (EE UU) en 1929, Edward Osborne Wilson perdió la visión de un ojo en un accidente de pesca a los siete años de edad; ya por entonces le gustaba avistar aves, pero pasó a interesarse por los insectos. Descubrió la primera colonia de hormigas de fuego con solo trece años, y posteriormente asistió a las universidades de Alabama y Harvard. Su trabajo se centró sobre todo en las hormigas, pero también se ocupó de la biogeografía de islas.

Ambientalista destacado, ha liderado esfuerzos por preservar la biodiversidad y educar al público al respecto. Ha recibido más de 150 premios, entre ellos, la Medalla Nacional de Ciencia, el Premio Cosmos, el Premio Pulitzer de no ficción (en dos ocasiones), y fue nombrado entre los ambientalistas más destacados del siglo por las revistas *Time* y *Audobon*.

Obras principales

1984 *Biophilia.*
1998 *Consilience: the unity of knowledge.*
2014 *The meaning of human existence.*



Habría que preservar toda la biodiversidad como algo precioso, mientras aprendemos sobre su uso y su significado para la humanidad.
Edward O. Wilson



interfiriendo en su crecimiento y desarrollo. La contaminación del agua se debe sobre todo a las aguas residuales, o a sustancias químicas absorbidas por el agua filtrada desde tierras agrícolas. Esta contaminación reduce los niveles de oxígeno en el agua y dificulta la supervivencia de algunas especies, sobre todo combinada con temperaturas del agua en ascenso por el cambio climático. Las corrientes de agua dulce donde desovan algunas especies, por ejemplo, pueden volverse inhabitables por la contaminación.

Algunos organismos absorben ciertas sustancias, como pesticidas agrícolas, más rápidamente de lo que las pueden excretar, en un proceso llamado bioacumulación. Las concentraciones iniciales bajas pueden no representar un problema, pero, a medida que se van acumulando en la cadena alimenticia –pasando del fitoplancton a los peces y a los mamíferos, por ejemplo–, llegan a alcanzar un grado tal que pueden causar defectos de nacimiento y perturbar los niveles hormonales y el sistema inmune.

El rápido crecimiento de la población humana ha supuesto daños aún mayores para el medio ambiente. La población mundial ha aumentado de menos de 1000 millones de personas, en 1800, a más de 7000 millones, y en 2050 se espera que alcance casi los 10 000 millones. Con el crecimiento de la población, crecen también otras amenazas a la biodiversidad: el comercio y la facilidad para viajar facilitan la difusión de especies invasoras; el desarrollo urbano y la extracción de recursos destruyen hábitats; se genera más contaminación; y se sobreexplota la tierra. Será difícil limitar los impactos del crecimiento poblacional humano, ya que cada vez más personas dependen de alimento y vivienda para sobrevivir, y cada vez demandan más bienes en una sociedad de consumo en proceso de globalización.

Perturbar el equilibrio

El aumento de población es también el motor de la sobreexplotación, la última amenaza humana incluida en el acrónimo en inglés HIPPO. Presente en la silvicultura, el pastoreo de ganado y la agricultura comercial, la



La caza furtiva, la deforestación y otras actividades humanas han contribuido en gran medida a la condición de peligro crítico en que vive el gorila occidental de llanura.



La construcción de ferrocarriles en EE UU llegó acompañada de cazadores contratados para diezmar la población de bisontes, el sustento de las tribus nativas. A finales del siglo XIX quedaban muy pocos bisontes en estado salvaje.

sobreexplotación se da también en la caza, la recolección y la pesca, además de en la explotación involuntaria, caso del pescado que se descarta en las capturas. Cuando la tasa de explotación excede la de reposición por reproducción o actividades humanas como la reforestación, la explotación no es sostenible, y, a falta de regulación, puede conducir a la extinción local (o extirpación) de especies.

Un estudio de la Lista Roja de la UICN en 2016 mostró que el 72 % de las especies consideradas amenazadas se explotan a una tasa que impide que su número se recupere. Un 62 % de las especies están en riesgo solo por actividades agropecuarias tales como la ganadería, la tala de árboles y el cultivo para obtener alimentos, combustible, fibra y pienso para el ganado.

Proteger la biodiversidad

En realidad, las cinco amenazas HIPPO identificadas por Wilson están interrelacionadas, y no suele haber una única razón por la que una especie dada esté amenazada. El desarrollo agrícola, por ejemplo, puede no solo destruir un hábitat, sino también causar la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la contaminación y al cambio climático. Más del 80 % de las especies de la Lista Roja de la UICN están afectadas por más de una de las cinco grandes amenazas a la biodiversidad.

La biodiversidad mantiene la salud de los ecosistemas del planeta. Los ecosistemas son un equilibrio delicado de criaturas vivas, tanto vegetales como animales, además del suelo, el aire y el agua en que viven. Los ecosistemas sanos aportan recursos que sustentan la vida humana y de todo tipo, favorecen la resistencia frente a desastres naturales e impactos causados por el ser humano, como el cambio climático, y, además, aportan recursos recreativos, médicos y biológicos.

Las amenazas a la biodiversidad que plantea la actividad humana son graves, pero se están desarrollando los modos de protegerla. Ante todo, está el enfoque «sostenible» de la agricultura y la pesca, que permite a las especies mantenerse a un nivel estable, o incluso aumentar con el tiempo. Las áreas de protección oficial, en tierra, agua y hielo, ayudan a conservar especies amenazadas, y las negociaciones y acuerdos nacionales e internacionales pueden mitigar el impacto de actividades legales o ilegales, como la caza furtiva. También la educación ciudadana contribuye a que se comprendan mejor las amenazas a la biodiversidad, y cómo protegerla para las generaciones futuras. ■

Biomas antropogénicos

La biosfera –que conforman todas las zonas de la Tierra y su atmósfera que contienen seres vivos– consiste en biomas, que son grandes ecosistemas basados en un medio específico, como el desierto o la pluvisilva. El impacto de la actividad humana sobre la biodiversidad y la transformación de gran parte del planeta han llevado a los ecólogos a reevaluar los biomas y a considerar necesaria la designación de biomas antropogénicos, que se agrupan en seis categorías principales: asentamientos densos, aldeas, tierras de cultivo, pastizales, bosque y tierras vírgenes.

A diferencia de otros biomas, que pueden alcanzar dimensiones continentales, los biomas antropogénicos forman un mosaico de parcelas sobre la superficie terrestre. Según los ecólogos, a más del 75 % de las tierras libres de hielo de la Tierra les ha afectado ya algún tipo de actividad humana, sobre todo en los asentamientos densos (zonas urbanas) y aldeas (asentamientos densos agrícolas).



ESTAMOS EN LA FASE INICIAL DE UNA EXTINCION MASIVA

PUNTOS CALIENTES DE LA BIODIVERSIDAD

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Norman Myers (n. 1934)

ANTES
1950 Theodosius Dobzhansky estudia la diversidad vegetal en los trópicos.

DESPUÉS
2000 Myers y su equipo reevalúan la lista de puntos calientes y añaden varios nuevos, llevando el total a 25.

2003 Un artículo en *American Scientist* critica concentrar el esfuerzo conservacionista en puntos calientes, afirmando que supone descuidar lugares importantes con menos especies.

2011 Un equipo de investigación confirma los bosques del este de Australia como 35.º punto caliente.

2016 La llanura costera norteamericana cumple los criterios de un punto caliente global, y se convierte en el 36.º.

Un punto caliente de la biodiversidad es un área con una alta concentración de especies vegetales y animales. El ambientalista británico Norman Myers acuñó la expresión en 1988 para describir áreas biológicamente ricas y gravemente amenazadas. Ante el reto enorme y creciente de extinciones masivas de especies causadas por la destrucción de hábitats clave, Myers defendió la necesidad de establecer prioridades, con el fin de concentrar recursos y conservar tantas formas de vida como sea posible.

Las exuberantes laderas y bosques de Arunachal Pradesh (India) se hallan en el punto caliente indobirmano. La zona contiene el 40 % de las especies vegetales y animales indias.

Definir puntos calientes

En un principio, Myers identificó diez puntos calientes para conservar especies de plantas endémicas (que no crecen en ningún otro lugar de la Tierra). En 2000 había refinado el concepto para centrar la atención en regiones que cumplían dos criterios:



Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Deforestación 254–259 ▪ Iniciativa por una biosfera sostenible 322–323



Nuestro bienestar está íntimamente ligado al de la vida salvaje [...], salvando la vida salvaje, podríamos salvar la nuestra.
Norman Myers



debían contener al menos 1500 plantas vasculares (con raíces, tallo y hojas) endémicas, y haber perdido al menos el 70 % de la vegetación primaria (las plantas que crecían originalmente en la zona). La organización ambiental Conservation International, que aplica el concepto de Myers para guiar sus esfuerzos, tiene hoy catalogadas 36 regiones de tales características. Aunque dichas regiones representan solo el 2,3 % de la superficie terrestre, albergan casi el 60 % de las especies de plantas, anfibios, reptiles, mamíferos y aves del planeta, y gran parte de esas especies viven solo en sus respectivos puntos calientes.

La mayoría de los puntos calientes se encuentran en regiones tropicales o subtropicales. El más amenazado es el área indobirmana del Sureste Asiático. Solo queda el 5 % del hábitat original, pero sus ríos, humedales y bosques son vitales para la conservación de mamíferos, aves, tortugas de agua dulce y peces. Entre los animales endémicos de la región está el saola, animal del bosque emparentado con vacas y toros, pero con aspecto de antílope; fue visto por primera vez en 1992, en la parte vietnamita de la cordillera Annamita. El amenazado delfín del Irawadi vive en las costas del Sureste Asiático y las islas de Indonesia. Otros animales raros son el ciervo de Eld, el gato pescador y el ibis gigante.

Medidas protectoras

Las organizaciones ambientales acuerdan objetivos para cada punto caliente, y confeccionan listas de especies en peligro y planes de conservación y gestión para las áreas con hábitat adecuado y poblaciones viables de plantas y animales objetivo. Los lugares se califican en función de lo vulnerables e irreemplazables que son.

Los dos criterios de Myers han sido criticados por quienes consideran que no tienen en cuenta el uso cambiante de la tierra en lugares donde se ha destruido menos del 70 % del hábitat. La selva amazónica, por ejemplo, no se encuentra en un punto caliente, pero se está despejando más rápido que ninguna otra de la Tierra. ▪



Estamos en la fase inicial de un holocausto biótico de origen humano –una extinción generalizada de especies– que podría empobrecer el planeta durante al menos cinco millones de años.
Norman Myers





Norman Myers

Myers nació en 1934, y se crió en el norte de Inglaterra. Tras estudiar en la Universidad de Oxford, se mudó a Kenia, donde fue oficial de distrito y profesor. En la década de 1970, estudió en la Universidad de California en Berkeley, donde creció su interés por el medio ambiente, y criticó la deforestación causada para crear ranchos de ganado, a la que aludió como «conexión hamburguesa».

Myers planteó el concepto de los puntos calientes de la biodiversidad en el artículo «Threatened biotas: "hotspots" in tropical forests», publicado en *The Environmentalist* en 1988. En *Ultimate security: the environmental basis of political stability*, su primer libro, Myers defendió que los problemas ambientales causan crisis sociales y políticas. En 2007, la revista *Time* lo nombró Héroe del medio ambiente.

Obras principales

1988 «Threatened biotas: "hotspots" in tropical forests».
1993 *Ultimate security: the environmental basis of political stability.*

LA DIVER
DE LA VID

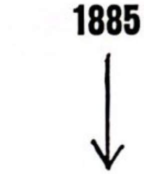
SIDAD
A











Nuestra comprensión de la diversidad, el comportamiento y la interacción de los seres vivos ha avanzado mucho desde que Aristóteles descubrió que en las colonias de abejas hay reina y obreras. Los progresos de la tecnología, las observaciones de campo y los experimentos en el laboratorio han ampliado nuestro conocimiento, y el estudio moderno de la conducta animal –la etología– sigue ofreciendo sorpresas.

La vida bajo el microscopio

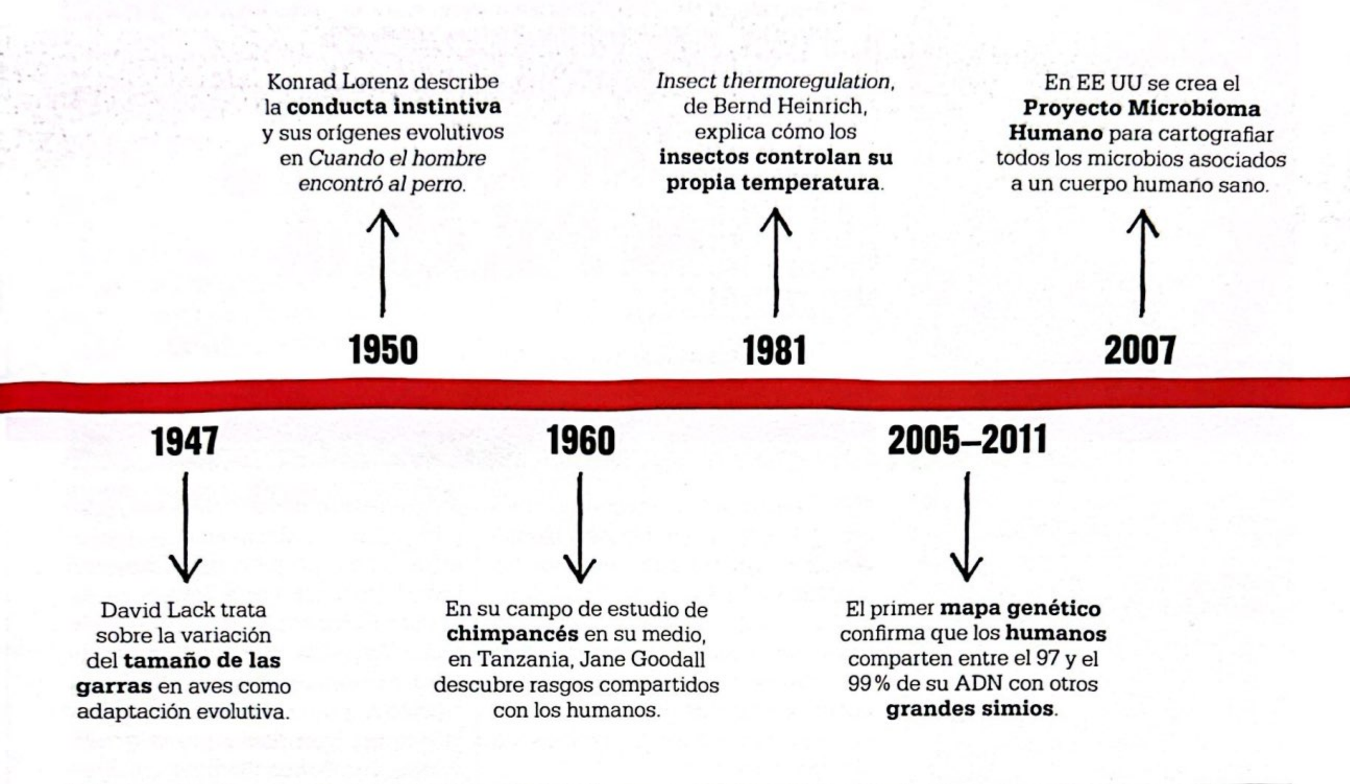
Hasta la invención del microscopio, nadie conocía la existencia de las bacterias, por no hablar de su actividad. Las observó por primera vez el microscopista neerlandés Antonie van Leeuwenhoek en 1676, con un instrumento construido por él mismo. Llamó «animálculos» a estos organismos minúsculos, de los que poco se supo durante muchos años. En la década de 1860, el químico francés Louis Pasteur y el microbiólogo alemán Robert Koch desarrollaron la teoría microbiana o germinal de la enfermedad, señalando el papel dañino de las bacterias. Estudios posteriores mostraron también sus aspectos positivos: facilitar la digestión; inhibir el crecimiento de otras bacterias patógenas; «fijar» o convertir el nitrógeno en moléculas útiles para el crecimiento vegetal; y la descomposición de materia orgánica muerta, que libera nutrientes a la red trófica.

Otro hallazgo debido a la microscopía fue el del mutualismo entre hongos y árboles, por el patólogo vegetal alemán Albert Frank, en 1885. Al estudiar lo que creía una infección patológica, Frank descubrió que los árboles con hongos en las raíces estaban más sanos que los que no las tenían. Las hifas de los hongos hacen más eficientes las raíces para obtener nitratos y fosfatos del suelo, y, a cambio, los hongos obtienen azúcares y carbono del árbol.

Vidas conectadas

Ningún organismo vive aislado de su ecosistema. Las interacciones entre ellos son complejas, y aún se está descubriendo mucho sobre ellas. Una gran aportación a este campo fue la del zoólogo británico Charles Elton, quien, en su obra *Animal ecology*, de 1927, estableció muchos principios importantes del comportamiento animal, como las cadenas y redes tróficas, el tamaño de las presas, y el concepto de nicho ecológico.

La etología, que estudia la conducta animal y su base y desarrollo



evolutivos, es una parte importante de los estudios actuales. Antes, en 1837, el entomólogo británico George Newport descubrió que las polillas y abejas aumentan la temperatura del tórax con su actividad muscular. En la década de 1970, el entomólogo germano-estadounidense Bernd Heinrich y otros descubrieron otras adaptaciones termorreguladoras en insectos. Como heterotermos, son capaces de mantener temperaturas distintas en distintas partes del cuerpo.

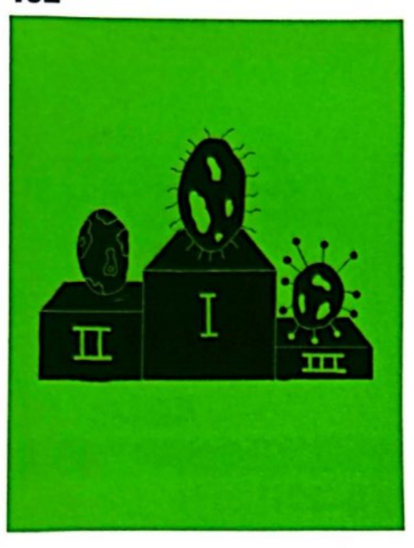
Los estudios actuales combinan experimentos de laboratorio, observaciones de campo y nuevas tecnologías, como la termografía infrarroja, para comprender mejor el comportamiento de los insectos.

Las observaciones de campo son una herramienta fundamental en los estudios etológicos. En la década de 1940, el ornitólogo británico David Lack estudió los factores que controlan el número de huevos que ponen las aves. Según su hipótesis de la limitación de alimento, el número de huevos en cada especie ha evolucionado según el alimento disponible. La presión evolutiva ha creado una correlación entre tamaño de la nidada y disponibilidad de alimento.

El zoólogo austriaco Konrad Lorenz y el biólogo neerlandés Nikolaas Tinbergen también estudiaron animales salvajes para comprender su comportamiento. La obra de Lorenz *Cuando el hombre encontró al perro*, de 1950, explica la lealtad de los perros hacia sus dueños a partir de la lealtad instintiva hacia el jefe de la manada en el medio salvaje. Los experimentos de campo de Tinbergen mostraron que los polluelos de gaviota, que pican en una marca roja del pico de los padres cuando tienen hambre, hacen lo mismo sobre marcas rojas en un pico artificial.

Rasgos humanos

Además de tales estudios a corto plazo, la primatóloga y etóloga británica Jane Goodall realizó observaciones de campo durante más tiempo, al estudiar a los chimpancés en Tanzania entre 1960 y 1975. Sus hallazgos ponían en duda la noción de que el comportamiento humano sea único en el mundo animal, e indicaban que los chimpancés eran más próximos a nosotros por conducta de lo que se suele creer. Observó, por ejemplo, que los chimpancés expresan su estado de ánimo con una gama extensa de expresiones faciales y lenguaje corporal, que fabrican y usan herramientas, se comportan de modo cooperativo y, a veces, hacen la guerra contra grupos de chimpancés rivales. ■



LOS MICROBIOS TENDRÁN LA ÚLTIMA PALABRA

MICROBIOLOGÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Louis Pasteur (1822–1895)

ANTES
1683 El científico aficionado neerlandés Antonie van Leeuwenhoek observa bacterias y protozoos al microscopio.

1796 Edward Jenner inocula la primera vacuna, utilizando el virus de la viruela de vaca para proteger de la viruela.

DESPUÉS
1926 El microbiólogo estadounidense Thomas Rivers distingue entre virus y bacterias.

1928 Al estudiar la gripe, el bacteriólogo escocés Alexander Fleming descubre la penicilina.

2007 Se completa un inventario de todos los microbios asociados con un cuerpo humano sano.

Los microbios –bacterias, mohos, virus, protozoos y algas– están presentes en todos los medios, y viven en el suelo, el agua y el aire. Algunos microbios causan enfermedades, pero la mayoría son vitales para la vida en la Tierra. Entre otras cosas, descomponen la materia orgánica para su reciclaje en el ecosistema.

También viven billones de microbios sobre el cuerpo humano y en su interior. Los más comunes son bacterias beneficiosas que ayudan a digerir, producen vitaminas y ayudan al sistema inmune a localizar y atacar a otros microbios más dañinos. Los científicos no pudieron comprender los microbios hasta verlos, y las primeras observaciones tuvieron lugar en el siglo XVII, con el recién inventado microscopio. Revelaron un mundo hasta entonces desconocido repleto de vida microbiótica. En la misma época se empezó a designar a estos organismos minúsculos con la palabra «germen», que originalmente significaba «semilla».



Los microbios son las abejas obreras que realizan las tareas más importantes del cuerpo.
Robynne Chutkan
Doctora experta en microbiomas y autora



Combatir la enfermedad

Algunos científicos de los siglos XVII y XVIII creían que ciertos «gérmenes» causaban enfermedades, pero la creencia general era que estas eran el resultado espontáneo de alguna debilidad inherente del organismo. Hasta el minucioso trabajo de laboratorio del químico francés del siglo XIX Louis Pasteur, no se demostró la teoría microbiana, o germinal, de la enfermedad.

Pasteur comenzó examinando el proceso de la fermentación, y descubrió que el vino se agriaba por la acción de agentes externos: microbios, o gérmenes. Una crisis de la industria francesa de la seda, causada por una epidemia entre los gusanos, permitió a Pasteur aislar e identificar los microorganismos que causaban aquella enfermedad en particular.

Véase también: Clasificación de los seres vivos 82–83 ▪ El medio microbiológico 84–85 ▪ El ecosistema 134–137



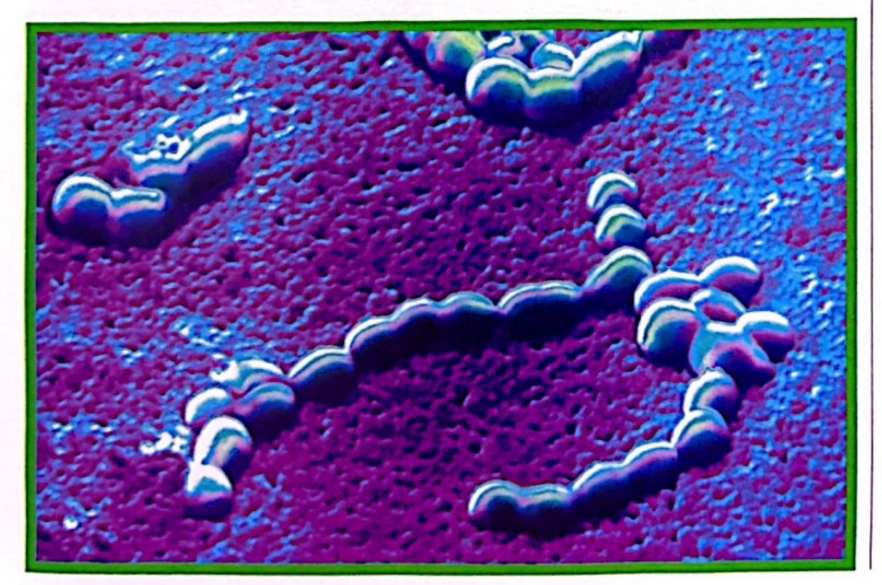
Cuando se trata de observar, la suerte solo favorece a la mente preparada.
Louis Pasteur



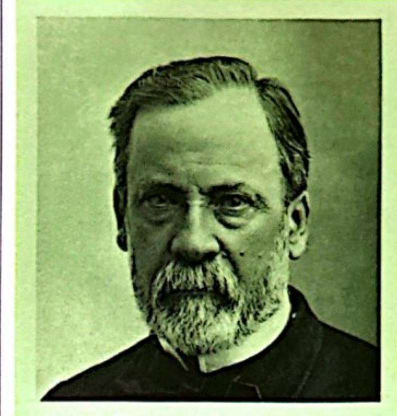
Pasteur amplió la teoría germinal a las enfermedades humanas, proponiendo que los gérmenes invaden el cuerpo y causan males específicos. Casi cien años antes, Edward Jenner había demostrado que podía prevenirse una enfermedad con una vacuna, es decir, un virus similar al microbio causante de la enfermedad. Pasteur comprobó que una forma atenuada o debilitada de un germen patógeno, producida en el laboratorio e inyectada al huésped humano o animal, era especialmente eficaz para ayudar al sistema inmune a combatir la enfermedad. Pasteur se enfrentó a una fuerte resistencia inicial, pero desarrolló vacunas contra el carbunco, el cólera aviar y la rabia, para la cual hizo la primera prueba en un ser humano.

Aniquilar gérmenes

Posteriormente, la atención se centró en hallar agentes para matar gérmenes, o antibióticos, como la penicilina, descubierta por Alexander Fleming. Desde entonces se ha continuado con la estrategia de matar microbios, pero el enfoque de «tala y quema» tiene sus inconvenientes: mata los microbios beneficiosos, además de los dañinos, y favorece la resistencia de bacterias que pueden acabar por volver ineficaces los antibióticos. ▪



La bacteria *Enterococcus faecalis* es un microbio que vive en el tracto intestinal de los humanos sanos, pero, si pasa a otras partes del cuerpo, puede causar infecciones graves.



Louis Pasteur

Nacido en Dole (Francia) en 1822, Pasteur fue hijo de un curtidor humilde. No fue un estudiante brillante, pero se esforzaba, y obtuvo la licenciatura en 1842 y el doctorado en ciencias en 1847. Tras enseñar en varias universidades, en 1867 obtuvo la cátedra de química en la Sorbona de París. Su principal interés investigador fue el proceso de fermentación. Pasteur descubrió que la fermentación del vino y la cerveza era causada por microbios, a los que se podía matar con un tratamiento calorífico breve y moderado, hoy día conocido en su honor como pasteurización. Su teoría microbiana llevó al desarrollo de las vacunas, aún hoy un elemento vital de control de las enfermedades. En 1887 fundó el Instituto Pasteur, que inauguró en 1888 y que sigue trabajando en la prevención y lucha contra la enfermedad.

Obras principales

1870 *Études sur la maladie, des vers à soie.*
1878 *Les microbes organisés: leur role dans la fermentation, la putrefaction et la contagion.*
1886 *Traitement de la rage.*



CIERTAS ESPECIES DE ARBOLES VIVEN EN SIMBIOSIS CON HONGOS

LA UBICUIDAD DE LAS MICORRIZAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Albert Frank (1839–1900)

ANTES
1840 El botánico alemán Theodor Hartig descubre una red de filamentos en las raíces de los pinos.

1874 Hellmuth Bruchmann, biólogo alemán, observa que los filamentos de la «red de Hartig» son fúngicos.

DESPUÉS
1937 A. B. Hatch, botánico estadounidense, señala la relación beneficiosa entre pinos y hongos micorrícicos.

1950 Los botánicos suecos Elias Melin y Harald Nilsson muestran que las raíces de las plantas con micorrizas extraen más nutrientes del suelo.

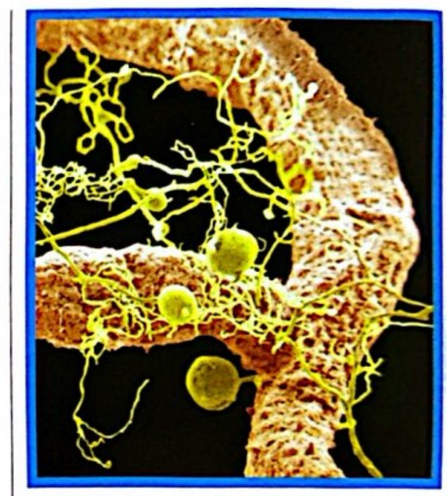
1960 El botánico sueco Erik Björkman muestra cómo las plantas aportan carbono a las micorrizas a cambio de fosfatos y nitratos.

En 1885, Albert Frank, profesor de patología vegetal de la Universidad Agrícola de Berlín, fue el primero en observar el vínculo entre los hongos que crecen sobre las raíces de los árboles y la salud de dichos árboles. Frank comprendió que no se trataba de infecciones patológicas, sino de socios subterráneos: lejos de padecer, los árboles parecían beneficiarse de una nutrición mejorada gracias a los hongos. Acuñó un término nuevo para dicha sociedad, «micorriza», del griego *mykes* («hongo») y *rhiza* («raíz»).

Micorrizas en acción

Las falsas trufas son un ejemplo del componente fúngico de esta relación simbiótica. Los botánicos prusianos del siglo XIX notaron la presencia de estos hongos bajo las píceas, y que cada raíz del árbol tenía un envoltorio fúngico y le correspondía una trufa. No lo sabían, pero estaban siendo testigos de un fenómeno vital para muchos ecosistemas.

Los hongos suelen nutrirse de un aporte de materia orgánica, de la que extraen alimento por digestión externa. Una capa gruesa de detritos del bosque es perfecta. Los hongos vierten sustancias químicas digestivas sobre el alimento, y absorben los compuestos orgánicos solubles a través de una red de filamentos microscópicos –hifas–, llamada micelio.



Micorrizas en la raíz de una planta de soja. En las micorrizas arbusculares, las puntas de las hifas penetran en las células de la raíz de la planta, optimizando el intercambio de nutrientes.

Las plantas dependen de pelos radicales para absorber agua y minerales, como nitratos y fosfatos, pero su crecimiento tiene un límite, y, por tanto, lo tiene también la cantidad de nutrientes que son capaces de absorber. Las hifas de las micorrizas pueden cubrir un área mucho más extensa, absorbiendo una cantidad

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Mutualismos 56–59 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ El flujo de energía en los ecosistemas 138–139

Intercambio beneficioso entre micorrizas y raíces vegetales





La relación mutualista entre los hongos y las plantas es el producto de una larga evolución. El 90 % de todas las especies de plantas dependen de la nutrición y protección que ofrecen los hongos, a los que a cambio aportan alimento.

muy superior de minerales, y, cuando se conectan a las raíces, extienden el sistema radicular, haciendo así que a la planta le lleguen más nutrientes.

Frank comprendió el beneficio mutuo de la relación, una combinación ganadora tanto para la planta como para el hongo. A cambio de aportar minerales, el hongo recibe azúcares fabricados por fotosíntesis en las hojas y transportados por la savia hasta las raíces, azúcares que suplementan el aporte de nutrientes que recibe de la materia orgánica muerta.

Redes antiguas

Los fósiles de plantas de hace 400 millones de años, cuando la vegetación comenzó a extenderse por la tierra seca, muestran restos de hilos fúngicos, y esto apunta a que las micorrizas fueron claves para la evolución de la vida terrestre. La mayoría de las plantas actuales siguen asociándose con hongos de esta manera. Los árboles con micorrizas son más resistentes a la sequía y la enfermedad, y hasta son capaces de comunicar señales de alarma, liberando sustancias químicas en respuesta al ataque de los herbívoros. La red fúngica que conecta los árboles se ha apodado «*wood wide web*». ■



[El hongo] realiza una función de «comadrona», y se encarga de la nutrición completa del árbol desde el suelo.
Albert Frank



Micorrizas como indicadores de contaminación

Los hongos de las micorrizas no solo son buenos para la salud de las plantas: son indicadores de la salud de todo el medio ambiente. Los experimentos de laboratorio con estos hongos muestran que algunos crecen mal en presencia de toxinas, por lo que sirven para detectar contaminantes en el aire o el suelo. Algunos hongos dejan de crecer si se exponen a metales pesados, como el plomo o el cadmio, y, dado que distintos hongos reaccionan de modo diferente a los cambios ambientales, ciertas especies sirven para detectar tipos específicos de contaminación.

Las micorrizas son también indicadores útiles de la salud de su hábitat nativo. Muchos forman sobre las raíces cuerpos en forma de coliflor, menores en suelo contaminado. Los propios árboles responden a la contaminación con brotes más débiles, pero la respuesta de las micorrizas es más aguda, y sirve como señal temprana de un hábitat en declive.



El crecimiento débil de la *Russula mustelina*, hongo micorrícico de los bosques de pícea de Europa y América del Norte, sirve de indicador de la contaminación del aire.

EL ALIMENTO ES LA CUESTION CANDENTE

ECOLOGÍA ANIMAL



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Charles Elton (1900–1991), **George Evelyn Hutchinson** (1903–1991)

ANTES
Siglo IX El autor árabe Al Jahiz introduce el concepto de cadena alimenticia en *Kitab al hayawan (El libro de los animales)*, y afirma que «todo animal débil devora a los que son más débiles que él mismo».

1917 Joseph Grinnell, biólogo estadounidense, describe el nicho ecológico en su trabajo «The niche relationships of the California thrasher».

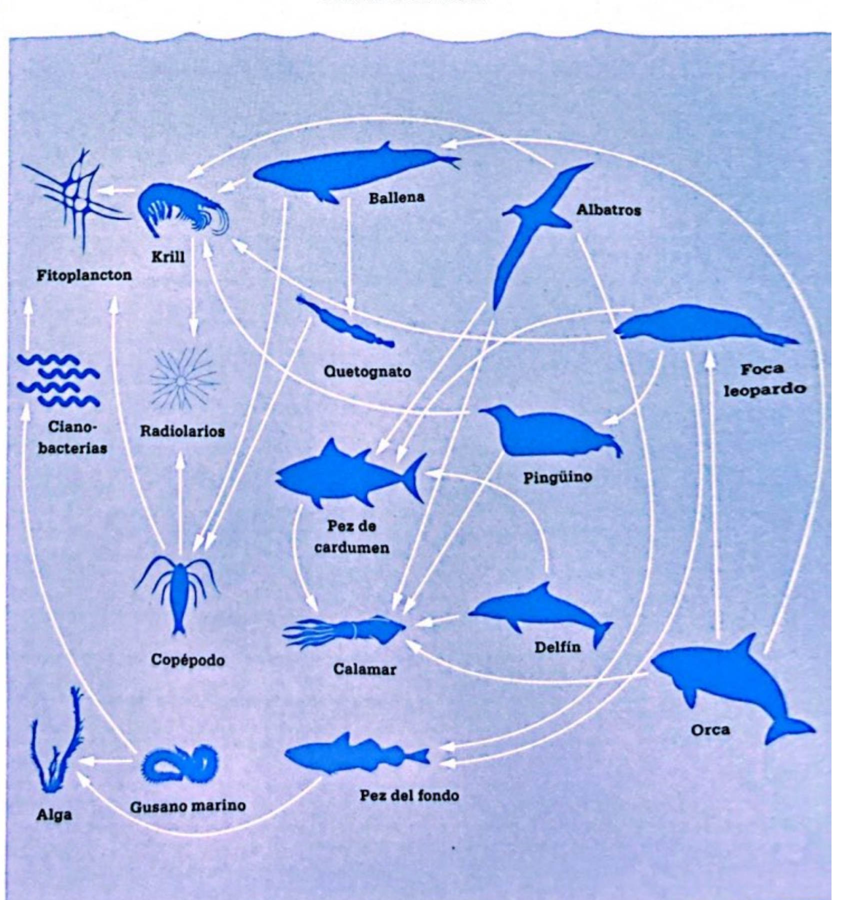
DESPUÉS
1960 El ecólogo y filósofo estadounidense Garrett Hardin afirma en un ensayo en la revista *Science* que «hay que dar cuenta de cada caso de aparente coexistencia».

1973 El ecólogo australiano Robert May publica *Stability and complexity in model ecosystems*, donde emplea modelos matemáticos para demostrar que los ecosistemas complejos no conducen necesariamente a la estabilidad.

El concepto de cadenas tróficas o alimenticias –la idea de que todas las criaturas vivas están vinculadas entre sí por su dependencia de otras especies para alimentarse– se remonta a muchos siglos atrás, pero no fue hasta principios del siglo XX cuando los científicos desarrollaron la noción de cadenas tróficas formando una red.

El pionero de este enfoque fue el zoólogo británico Charles Elton, cuya obra *Animal ecology* (1927) describe lo que llamó el ciclo trófico, y a continuación desarrolla teorías que abarcan interacciones más complejas entre animales y el medio, el enfoque en que se basa la ecología animal moderna. Elton comparó el conocimiento de cada especie individual de planta y animal con las celdas de una colmena: cada «celda» de conocimiento es importante por sí misma, pero la unión de todas es más que la suma de las partes; es la colmena de la ecología. Hoy, el estudio de la ecología animal se centra en la interacción de los animales con el medio, en el papel de las diversas especies, en por qué las poblaciones crecen y menguan, en por qué cambia a veces el comportamiento de los animales y en el impacto sobre ellos del cambio ambiental. El principio subyacente del trabajo de los ecólogos animales es que, por lo general, hay un equilibrio en la naturaleza, de modo que, si la población de una especie dada

Red trófica



Una red trófica es una representación gráfica de las relaciones alimenticias entre distintas especies en una comunidad ecológica. Este ejemplo ilustra las relaciones de un ecosistema marino, con las orcas como los superdepredadores y el fitoplancton como productores primarios.

Véase también: Especies clave 60–65 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ El flujo de energía en los ecosistemas 138–139 ▪ Cascadas tróficas 140–143

crece demasiado, esta se regulará, normalmente por falta de alimento. No obstante, las relaciones entre los seres vivos y el medio cambian de uno a otro lugar y con el tiempo.

Cadena de dependencia

En *Animal ecology*, Elton esbozó los principios clave del estudio de las comunidades animales: cadenas y redes tróficas, tamaño del alimento y nichos ecológicos. Cada cadena y red trófica, afirmó, depende de los productores: plantas y algas que son el sustento de consumidores de plantas (herbívoros). Estos, a su vez, son el sustento de uno o más niveles de consumidores de carne (carnívoros). Los grandes carnívoros suelen comer animales menores, pero, como estos se reproducen más rápidamente, su número es suficiente para ofrecer sustento a los depredadores mayores.

La competencia por el alimento es muy dura cerca de la cima de una red trófica. Aunque superdepredadores como los grandes felinos y las grandes aves rapaces no tengan depredadores naturales, esto a menudo supone defender territorios frente a rivales de su misma especie, para garantizar su propio alimento y el de sus crías.



Todo animal está estrechamente vinculado a otros animales que lo rodean, y la relación es en gran medida alimenticia.
Charles Elton





Una araña atrapa un zigóptero, en un ejemplo que supone una excepción al principio del tamaño del alimento, como consecuencia de la agresividad y la fuerza del depredador.

Tamaño del alimento

Una de las nociones más relevantes de Elton es que las cadenas tróficas existen fundamentalmente por el principio del tamaño del alimento. Todos los carnívoros comen presas comprendidas entre ciertos límites de tamaño. No pueden atrapar y consumir animales por encima de cierto tamaño por no tener la fuerza, la habilidad o el tamaño suficientes. Eso no significa que los depredadores no puedan cazar y comer presas mayores que ellos mismos; una comadreja puede matar a un conejo mayor, por ser más agresiva. Una leona adulta, no obstante, siendo uno de los mayores superdepredadores del mundo, no puede matar a un elefante africano adulto sano. Asimismo, las larvas de libélula en el fondo de un estanque cazan pequeños renacuajos, pero no podrían comer una rana adulta.

Los animales pueden comer presas mucho menores, pero el esfuerzo no suele merecer la pena. Los lobos »

Predecir los efectos del cambio climático

Los ecólogos observan cambios en la población y distribución de los animales, y aplican modelos de cambio climático para predecir cómo cambiarán dentro de 5, 10, 50 o más años. Así, en el Ártico, cuyas temperaturas medias están subiendo más rápido que en ningún otro lugar, el hielo marino está retrocediendo. Los osos polares tienen que recorrer distancias mayores en busca de hielo en el que cazar focas, descansar y aparearse. Cuanto más lejos nadan, más energía consumen. El retroceso del hielo significa hambre para los osos polares, cuyo número y movimientos observan los científicos, comparando los datos con los de los cambios del hielo marino.

El oso polar tiene un papel vital en la ecología del Ártico. Como superdepredador y especie clave, necesita acceso a las focas, su dieta casi exclusiva. El número de focas regula la densidad de osos polares, cuya depredación a su vez regula la densidad y el éxito reproductivo de las focas.



Un oso polar encaramado a un témpano en el Ártico otea el mar en busca de presas. El retroceso del hielo marino amenaza la supervivencia de la especie.

Ciclos de población de liebres y linces

En los bosques boreales de Canadá, la presa favorita del lince es la liebre americana. Charles Elton estudió la relación entre sus respectivas poblaciones usando datos del periodo 1845–1925. Cuando las liebres abundan, los linces apenas cazan otra cosa; cuando alcanzan su densidad máxima, el alimento vegetal escasea, y algunas liebres mueren de hambre. Otras quedan debilitadas, y son presa fácil para, entre otros depredadores, los linces, que viven un tiempo de abundancia. Pero el número de liebres continúa cayendo, y acaba afectando al lince, que se ve obligado a cazar presas de menos provecho, como ratones y urogallos.

Cuando escasea la caza, los linces tienen camadas menores, o incluso dejan de criar. Algunos mueren de hambre. Uno o dos años después del mínimo de población de las liebres, decae la población de linces, en un ciclo que se repite cada entre ocho y once años.



Un lince canadiense atrapa una liebre, su presa predilecta. Cuando las liebres abundan, los linces comen dos de cada tres días.



El colibrí picoespada, especie nativa de América del Sur, tiene un pico largo que le permite libar el néctar de las largas flores de la pasionaria, *Passiflora mixta*. Al alimentarse, el colibrí disemina el polen de la planta.

cazan mamíferos medianos o grandes, como el alce. Si desaparecen esos mamíferos del entorno, cazar mamíferos menores, tales como ratones, difícilmente les aporta el sustento suficiente; la energía empleada en cazar presas pequeñas es mayor que la que obtienen al consumirlas.

Las plantas no pueden huir ni defenderse, por lo que a los herbívoros se aplican otras consideraciones en cuanto al tamaño. Hay un tamaño máximo de semilla, por ejemplo, que cabe en el pico de un pinzón dado, lo cual da a unas especies mayores ventajas sobre las demás. De modo análogo, cada especie de colibrí bebe néctar de flores solo hasta determinado tamaño, en función de la longitud del pico.

Nichos ecológicos

El nicho de un animal o de una planta es su papel, o su modo de vida, ecológico. Para el zoólogo estadounidense Joseph Grinnell, que trabajó en las primeras décadas del siglo xx, el nicho de un organismo se define como su hábitat. Grinnell estudió un ave, el cuitlacoche californiano, observando cómo se alimentaba, anidaba y se ocultaba de los depredadores entre la vegetación baja y densa del chaparral. Un nicho, sin embargo, es algo más complejo que el mero lugar en que vive un organismo. Los picabueyes y búfalos comparten exactamente el mismo hábitat –la sabana–, pero lo que precisan para sobrevivir es muy distinto: los búfalos comen herbáceas, mientras que los picabueyes dependen de las garrapatas que encuentren en la piel de los búfalos.

Charles Elton exploró el concepto de nicho ecológico en mayor profundidad, atendiendo al alimento como factor primario para definir el nicho de un animal. Lo que come y por quién es comido es esencial. Según el hábitat, un nicho particular puede ser ocupado por uno u otro animal. Elton citaba el ejemplo de un nicho ocupado por aves de presa que cazan animales como ratones y topillos. En un bosque de robles europeo, el nicho lo ocuparía el cárabo; mientras



La observación de las especies en la naturaleza me convence de que su existencia y persistencia está vitalmente vinculada al medio.

Joseph Grinnell





Las distintas especies se presionan unas a otras como burbujas de jabón, y, en su forcejeo constante, unas adquieren alguna ventaja sobre otras.
G. Evelyn Hutchinson



que, en una pradera abierta, el mismo papel correspondería al cernícalo.

Elton también mantuvo que, más allá de tolerar una serie de condiciones ambientales, los animales pueden también cambiarlas. La actividad leñadora y constructora de presas de los castores es uno de los ejemplos más obvios, pues crean hábitats para peces en las presas, para pájaros carpinteros en los árboles muertos y para libélulas en las orillas.

Nichos y competencia

El zoólogo de origen británico George Evelyn Hutchinson, mientras trabajaba en la Universidad de Yale entre las décadas de 1950 y 1970, examinó todos los procesos físicos, químicos y geológicos que operan en los ecosistemas, y propuso que el papel de cualquier ser vivo en su nicho incluye cómo se alimenta, reproduce, encuentra refugio e interactúa con otros organismos y con el medio. Cada especie de trucha –y de otros peces–, por ejemplo, tiene un determinado rango de tolerancia para la salinidad, la acidez y la temperatura del agua, así como una gama de presas y de condiciones del lecho fluvial o lacustre. Esto hace que unas sean mejores competidoras que otras, dependiendo de las condiciones del hábitat en que vivan. El trabajo de Hutchinson, considerado el padre de la ecología moderna, inspiró a otros científicos para explorar cómo animales que compiten entre sí se valen del medio de modos diferentes.

La amplitud de nicho de un animal o una planta comprende la gama completa de factores que requiere para prosperar. La rata gris, el mapache y el estornino son ejemplos de animales de nicho amplio, pues pueden sobrevivir bajo condiciones muy diversas. Esas especies se llaman generalistas. Otros animales, los especialistas, tienen exigencias más estrictas. El koala, por ejemplo, depende casi por entero de las hojas de eucalipto, y el guacamayo jacinto de la región del Pantanal en Brasil come casi exclusivamente los frutos duros de dos especies de palmera.

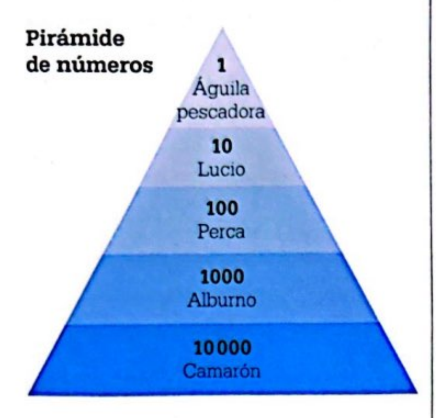
Los animales rara vez ocupan toda su amplitud de nicho, debido a la competencia entre especies. Entre las exigencias de hábitat de los azulejos norteamericanos están los árboles muertos con huecos dejados por los pájaros carpinteros, para poner huevos y criar a los polluelos. Estos abundan en muchos bosques, pero los azulejos no pueden ocuparlos todos, ya que a menudo pierden en la competencia con los más agresivos estorninos. Por tanto, su nicho realizado –los lugares que de hecho ocupan– no es tan extenso como su nicho potencial o fundamental.

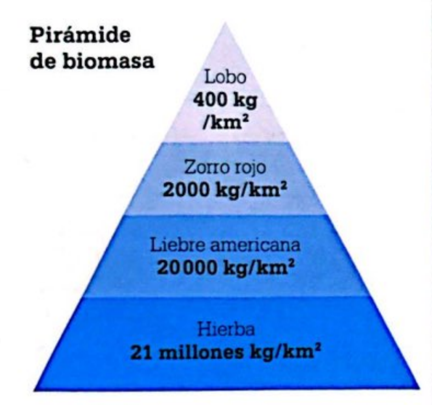
Muchos animales comparten algunos aspectos de su nicho, pero no así otros. Esto se conoce como solapamiento de nicho. Si diferentes especies viven en el mismo hábitat »



El koala, un verdadero especialista, debe comer un kilo de hojas de eucalipto al día. La especie solo vive en estado salvaje en Australia, donde abundan los eucaliptos.

Tres tipos principales de pirámide ecológica







Las pirámides ecológicas incluyen datos cuantificables de los ecosistemas: la de números, el tamaño de las poblaciones de cada especie; la de biomasa, su presencia relativa; la de energía, quién come qué y cuánto.

y tienen estilos de vida similares, competirán unas con otras, pero pueden ser capaces de vivir en estrecha proximidad si difieren ciertos aspectos de su dieta o su comportamiento. Esto se conoce como partición de nicho. En Puerto Rico, por ejemplo, varias especies de lagartijas anolis ocupan con éxito las mismas áreas, por elegir cada una partes diferentes de los árboles.

No obstante, el solapamiento tiene sus límites. Cuando dos animales con nichos idénticos viven en el mismo lugar, uno llevará al otro a la extinción. Este concepto –el principio de exclusión competitiva– esbozado por Joseph Grinnell en 1904, y desarrollado en un trabajo del ecólogo ruso Gueorgui Gause en 1934, se conoce como ley de Gause.

Pirámide de números

Charles Elton utilizó una pirámide como representación gráfica de los distintos niveles de una cadena trófica, con los productores en la base, los consumidores primarios en el nivel siguiente, y así sucesivamente. A menudo, los consumidores primarios –los insectos, en particular– superan en número a los productores, pero los consumidores en niveles más altos se vuelven menos numerosos hacia la cúspide de la pirámide. Este sistema no tiene en cuenta los parásitos; las pulgas y garrapatas de mamíferos y aves son siempre más numerosos que el total de vertebrados de un ecosistema dado.

En 1938, el ecólogo de origen alemán Frederick Bodenheimer modificó la pirámide de Elton, y creó una pirámide de biomasa que representa



El proceso básico de la dinámica trófica es la transferencia de energía de una parte del ecosistema a otra.
Raymond Lindeman



la cantidad de materia viva en un área dada a todos los niveles. Así tenía en cuenta el hecho de que algunos organismos son mucho mayores que otros, pero, al mostrar biomasas comparadas en un momento determinado, se observaban anomalías. Por ejemplo, en un estanque, la masa del fitoplancton productor (los organismos microscópicos fundamento de las redes tróficas acuáticas) puede ser inferior a la de los peces consumidores en un momento determinado, por lo que la pirámide estará invertida. El fitoplancton, sin embargo, se reproduce rápidamente cuando condiciones tales como la luz solar y los nutrientes son favorables. A lo largo



Organismos microscópicos como estas diatomeas son una parte importante de todas las pirámides ecológicas. Su gran número y rápida reproducción aportan masa y energía a las especies mayores de la pirámide.



Las tencas comen caracoles, y estos, perifiton (organismos microbianos adheridos a las plantas). Al reducir el número de caracoles, las tencas incrementan la biomasa del perifiton.

del tiempo, la masa del fitoplancton será muy superior a la de los peces.

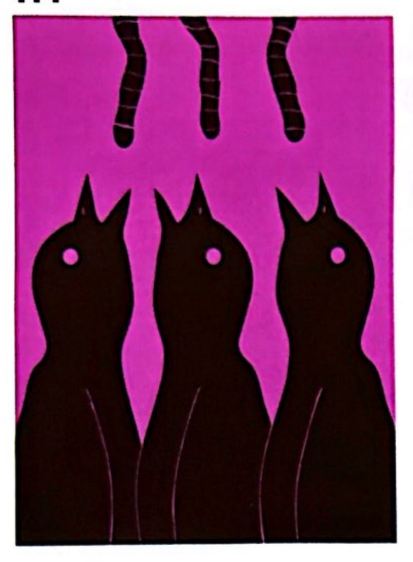
Pirámides tróficas

Raymond Lindeman, ecólogo estadounidense, propuso una pirámide energética, la llamada pirámide trófica, para mostrar la tasa a la que se transfiere energía de un nivel a otro al alimentarse de plantas los herbívoros, y de herbívoros, los depredadores. El nivel trófico de un organismo es la posición que ocupa en la cadena trófica. Las plantas y algas están en el nivel trófico 1; los herbívoros, en el 2; y el primer nivel de los depredadores es el 3. Es raro que haya más de cinco niveles. Las plantas convierten la energía solar en compuestos de carbono almacenados, y, cuando un herbívoro come una planta, parte de la energía se transfiere al animal. Cuando un depredador se come al herbívoro, obtiene una cantidad menor de esa energía, y así sucesivamente.

La ley del diezmo ecológico (o ley del diez por ciento) de Lindeman, publicada en 1942, explica que, cuando se consumen organismos, solo un 10 % aproximado de la energía que transfieren se almacena en forma de carne en el nivel trófico siguiente. El modelo energético es una representación más realista del estado de un ecosistema. Por ejemplo, si la biomasa de plantas acuáticas y peces en un estanque es la misma, pero las plantas se reproducen el doble de rápido que los peces, la energía de las plantas se representará como el doble de la de los peces. De este modo, nunca hay pirámides invertidas: siempre hay más energía en el nivel trófico más bajo que en el siguiente. Estimar la transferencia de energía, sin embargo, requiere mucha información sobre el consumo de energía, así como sobre el número y la masa de los organismos.

Pensamiento futuro

Las relaciones entre los seres vivos y el medio cambian de un lugar a otro y con el tiempo. El cambio climático global es un ejemplo de los factores ambientales que afectarán cada vez más a las comunidades animales. Algunos cambios ya se han producido, y uno de los desafíos del pensamiento ecológico futuro será predecir otros. ■



LAS AVES PONEN EL NUMERO DE HUEVOS QUE PRODUCE LA DESCENDENCIA OPTIMA

CONTROL DE LA NIDADA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
David Lack (1910–1973)

ANTES
1930 El británico Ronald Fisher combina el trabajo genético de Mendel con la teoría de la selección natural de Darwin, y sostiene que el esfuerzo invertido en la reproducción tiene que ofrecer ventajas.

DESPUÉS
1948 David Lack amplía su teoría del tamaño óptimo de nidada al de las camadas en los mamíferos.

1954 Lack desarrolla su hipótesis de la limitación de alimento en *The natural regulation of animal numbers* para incluir aves, mamíferos y especies de insectos.

1982 Tore Slagsvold propone la hipótesis de depredación del nido, en la que el tamaño de la nidada guarda relación con la probabilidad de ataques.

Por qué unas aves ponen más huevos que otras? Por ejemplo, el herrerillo común pone nueve huevos de media; el robín, seis; y el mirlo, cuatro. En la década de 1940, el ornitólogo y ecólogo evolutivo británico David Lack propuso una explicación que rápidamente obtuvo respaldo. La capacidad de poner de la hembra no limita el tamaño de la nidada, pues las aves pueden poner muchos más huevos de los que suelen poner. Esto puede demostrarse con experimentos de sustitución, en los que se retiran huevos del nido: el ave vuelve a poner repetidamente para compensar la pérdida.

La explicación de Lack era que el número de huevos que pone una especie ha evolucionado en función de la disponibilidad de alimento. En otras palabras, la naturaleza favorece nidadas de tamaños que corresponden al número máximo de polluelos



En los nidos de herrerillo común hay una media de nueve huevos, aunque las hembras pueden poner muchos más. Según David Lack, el alimento disponible determina el tamaño de la nidada.

Véase también: Ecología animal 106–113 ▪ Comportamiento animal 116–117 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Resiliencia ecológica 150–151

que los padres tienen posibilidades de mantener. Así, si una pareja de aves solo encuentra alimento suficiente para alimentar a seis polluelos, pero la hembra ha puesto doce huevos, la descendencia pasará hambre y puede morir. Si ha puesto uno solo, el polluelo será criado con éxito, pero la mayor parte del alimento disponible se desaprovechará. Ni doce huevos ni uno solo son buenas estrategias reproductivas. Poner seis ofrece las mejores posibilidades de criar el mayor número de polluelos.

La teoría se llamó hipótesis de limitación del alimento, o principio de Lack, y lo generalizaron él y otros al tamaño de las camadas de los mamíferos y de las puestas de peces e invertebrados.

El factor de la latitud

La hipótesis de Lack apuntaba también a la respuesta a otra cuestión, la de que la mayoría de las especies de aves tienen nidadas mayores en latitudes altas. De media, las aves próximas al ecuador ponen la mitad de huevos que las de la misma especie en latitudes del lejano norte. La tendencia podría explicarse por la mayor disponibilidad de alimento debida a los días largos de verano comparado con los más cortos del trópico.



Las nidadas son mayores a mayor latitud y con días más largos porque […] un día más largo permite encontrar más comida.
David Lack



Una puesta que resulte en una nidada menor de la que […] se podría alimentar y criar con éxito […] confiere ventajas.
Tore Slagsvold



Sin embargo, podría haber otros factores en juego. La mayor tasa de mortalidad en latitudes altas, de inviernos duros, pudo ser una presión evolutiva para dar nidadas mayores. Las posibilidades de supervivencia hasta la siguiente época de cría son bajas, y una población reducida significa más alimento disponible para los supervivientes en la temporada siguiente.

En 1982, el ecólogo evolutivo noruego Tore Slagsvold postuló la hipótesis de depredación del nido, según la cual, una tasa de depredación alta resultará en nidadas menores. Si un depredador da con un nido con muchos polluelos, se perderá más trabajo de los progenitores que si hay pocos. Además, la pareja que cría una nidada grande corre mayor riesgo de ser detectada por los depredadores. Algunos ecólogos argumentan que la relativa abundancia de depredadores en los trópicos ha pesado más que la disponibilidad de alimento en la evolución de nidadas pequeñas en latitudes bajas. ■

El cainismo y el piquero patiazul

Los piqueros patiazules son aves marinas nativas del océano Pacífico. Se alimentan en el océano, y acuden a los acantilados a criar. La hembra pone dos huevos, con unos cinco días de diferencia, y, para cuando eclosiona el segundo, el primer polluelo ya ha crecido bastante. Cuando abunda la comida, los progenitores encuentran suficiente para alimentar a ambos hasta que vuelen del nido. Cuando no es así, el polluelo mayor mata al menor a picotazos. Así obtiene más comida, y tiene más probabilidades de llegar a volar del nido. Si no mata a su hermano cuando escasea el alimento, ambos pueden morir de hambre.

Este comportamiento, basado en la disponibilidad de alimento, se llama «cainismo facultativo». En los alcatraces enmascarados, en cambio, el primer polluelo casi siempre mata al hermano o hermana, independientemente de cuánto alimento haya disponible.



Los piqueros patiazules se ven impelidos al cainismo por factores genéticos. La muerte de un hermano beneficia al perpetrador, y garantiza la supervivencia de la especie.



EL VINCULO CON UN PERRO FIEL ES EL MAS DURADERO DE ESTA TIERRA

COMPORTAMIENTO ANIMAL

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Konrad Lorenz (1903–1989), **Nikolaas Tinbergen** (1907–1988)

ANTES
1872 *La expresión de las emociones en el hombre y en los animales*, de Charles Darwin, propone que el comportamiento es instintivo y tiene base genética.

1951 En *El estudio del instinto*, Nikolaas Tinbergen pone los cimientos teóricos de la etología, el estudio del comportamiento animal.

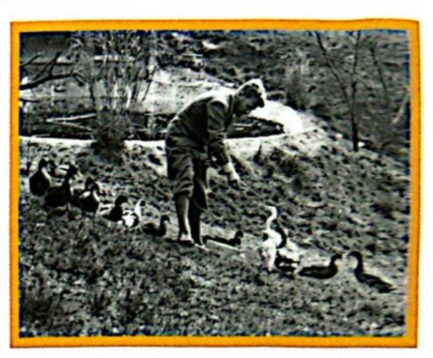
DESPUÉS
1967 Desmond Morris, zoólogo británico, aplica la etología al comportamiento humano en su popular obra *El mono desnudo*.

1976 En *El gen egoísta*, el biólogo evolutivo británico Richard Dawkins explica que el comportamiento animal en general está diseñado para transmitir los genes.

Cualquier dueño de un perro puede describir la relación de compañerismo y lealtad que mantiene con su mascota. El zoólogo Konrad Lorenz explicó en *Cuando el hombre encontró al perro* (1950) que el comportamiento de los perros y otras mascotas es esencialmente innato, o «actividad instintiva», en contraposición al comportamiento aprendido. Según Lorenz, el comportamiento instintivo ayuda al animal a sobrevivir como especie. La lealtad de un perro hacia su amo tiene su origen en el comportamiento natural de los antepasados salvajes del perro, que eran leales al líder de la manada, porque traía beneficios en términos de éxito en la caza y seguridad.

Experimentos de campo

Lorenz no estaba solo con sus teorías. Otros biólogos activos en este campo eran su compatriota Karl von Frisch y el neerlandés Nikolaas Tinbergen, quienes estudiaron a los animales en su medio natural. Hasta entonces, la mayoría de los estudios sobre comportamiento animal se habían realizado en el laboratorio o en un entorno artificial, por lo que la conducta observada no era del todo natural. Estudiar animales en la naturaleza tiene sus propios retos, sobre todo para crear experimentos de campo rigurosos y repetibles, de modo que los hallazgos se reconozcan como datos, y no como anécdotas.



La impronta en patos es un ejemplo de comportamiento instintivo que se puede manipular, para que ocurra con humanos y hasta con objetos inanimados.

El término «etología» fue acuñado por el entomólogo estadounidense William Morton Wheeler en 1902 para el estudio científico del comportamiento animal. Los etólogos estudian a los animales en su hábitat natural, combinando trabajo de laboratorio y de campo para describir el comportamiento en relación con la ecología, la evolución y la genética.

Los etólogos observaron que, en ciertas situaciones, los animales tienen respuestas conductuales predecibles. A esto lo llamaron «patrón de

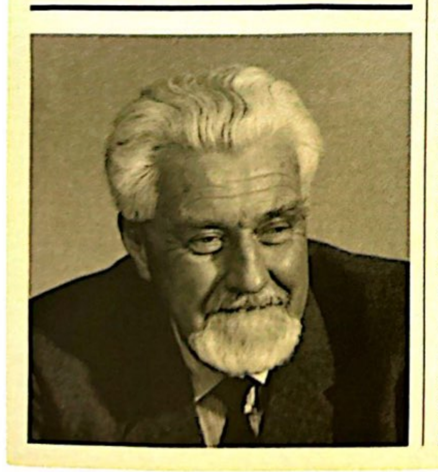
Véase también: El gen egoísta 38–39 ▪ Experimentos de campo 54–55 ▪ Especies clave 60–65 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Control de la nidada 114–115 ▪ Modelos animales para el comportamiento humano 118–125

acción fija» (PAF, o FAP, en inglés). El PAF es específico de cada especie, se repite siempre igual, y no se ve afectado por la experiencia. Los desencadenantes del comportamiento, o estímulos clave, son altamente específicos, pudiendo consistir en un color, forma o sonido. Así, los machos de pez espinoso responden agresivamente cuando entra otro macho en su parte del lecho fluvial. El desencadenante, según los etólogos, es ver el vientre rojo del macho.

Nikolaas Tinbergen observó que algunos estímulos clave artificiales funcionan mejor que los auténticos. Al estudiar el comportamiento de los polluelos de gaviota argéntea, que pican un punto rojo del pico de su progenitor para que regurgite alimento, constató que picaban también en el punto rojo de un pico falso, y que picaban igualmente e incluso con más entusiasmo un estrecho lápiz rojo con tres líneas blancas en un extremo si se les ofrecía. Tinbergen llamó a esto «estímulo supernormal», mostrando que el comportamiento animal instintivo puede manipularse artificialmente. ■



Konrad Lorenz



Nacido en Viena (Austria), a Lorenz le fascinaron los animales desde niño, y tuvo peces, aves, gatos y perros. Hijo de un cirujano ortopédico, estudió medicina en la Universidad de Viena, donde se licenció en 1928 y se doctoró en zoología en 1933. Sus numerosas mascotas fueron los primeros sujetos de sus estudios. Lorenz es más conocido quizá por describir el fenómeno llamado«impronta», en el que los polluelos recién nacidos establecen un vínculo con lo primero que ven al nacer (normalmente, la madre), y lo siguen allá adonde vaya. Tal conducta, observada en patos y otras aves, así como en mamíferos, es instintiva y ocurre poco después de nacer. Lorenz demostró la teoría imitando a un pato ante patitos recién nacidos. Una tribu de ellos no tardó en seguirlo a todas partes.

Obras principales

1949 *El anillo del rey Salomón.*
1950 *Cuando el hombre encontró al perro.*
1963 *Sobre la agresión.*
1981 *Fundamentos de la etología.*

REDEFINID «HERRAMIENTA», REDEFINID «HOMBRE», O ACEPTAD A LOS CHIMPANCÉS COMO HUMANOS

MODELOS ANIMALES PARA EL COMPORTAMIENTO HUMANO



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Jane Goodall (n. 1934)

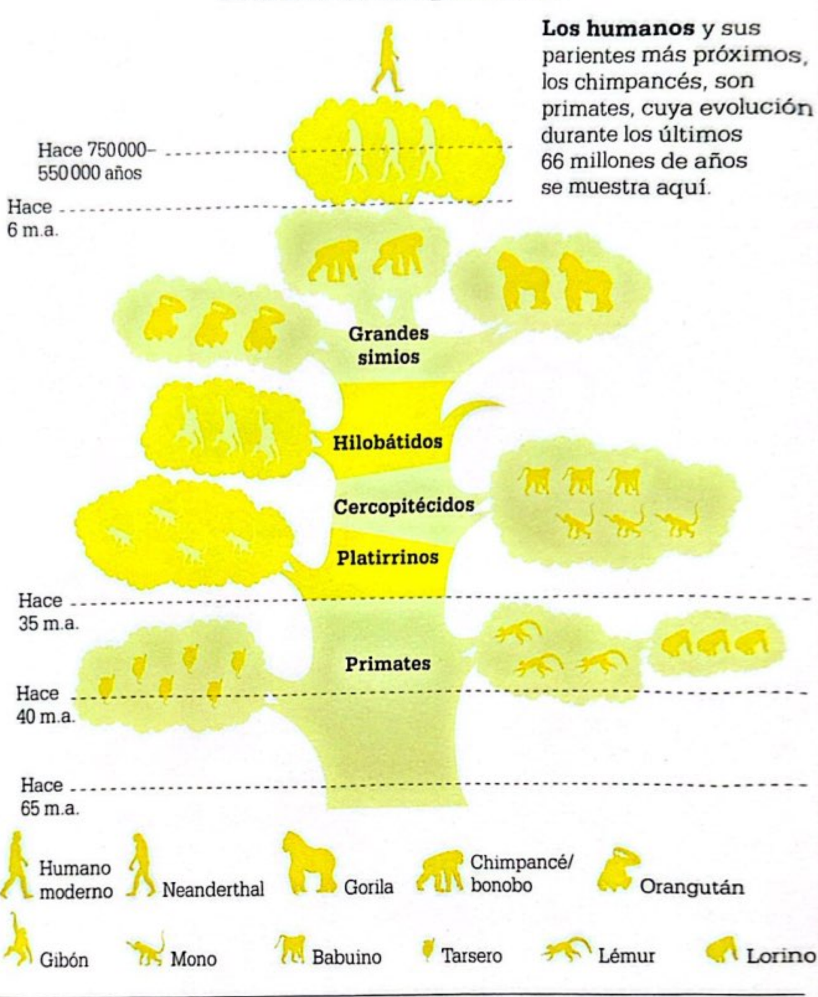
ANTES
1758 Carlos Linneo, padre de la taxonomía, se atreve a clasificar a los humanos dentro del resto de la vida, llamándolos *Homo sapiens* («hombre sabio»).

1859 La teoría de la evolución de Charles Darwin desafía la noción establecida de que el hombre es diferente al reino animal.

DESPUÉS
1963 Konrad Lorenz publica *Sobre la agresión*, donde afirma que la propensión a la guerra es innata entre los humanos.

1967 Desmond Morris, zoólogo y etólogo británico, publica *El mono desnudo*, estudio que describe el comportamiento humano en el contexto del reino animal.

El árbol de los primates



Los humanos y sus parientes más próximos, los chimpancés, son primates, cuya evolución durante los últimos 66 millones de años se muestra aquí.



En realidad, somos *Pan narrans*, el chimpancé que narra.
Terry Pratchett
Autor de fantasía británico



Los estudios moleculares recientes de los genomas de los seres humanos y otros animales han confirmado la teoría, propuesta por primera vez a mediados del siglo XIX por Darwin, de que compartimos un antepasado con los grandes simios. Pocos científicos discutirían hoy que el chimpancé común *(Pan troglodytes)* y el bonobo, o chimpancé pigmeo *(Pan paniscus)*, son nuestros parientes vivos más próximos. El estudio de estos animales, por tanto, ofrece una oportunidad única de aprender sobre nosotros mismos y los orígenes de nuestro comportamiento. La comunidad científica, sin embargo, siguió muchos años convencida de que la humanidad era diferente al resto de la naturaleza.

Fue en gran medida el trabajo de la primatóloga británica Jane Goodall el que permitió abrir los ojos y apreciar las semejanzas entre el chimpancé y el hombre. En 1961, Goodall comunicó a su mentor, Louis Leakey, una observación que iba a conmocionar al mundo científico: había visto a un chimpancé usar una herramienta. Era la primera vez que se documentaba este comportamiento, e iba a desafiar las ideas imperantes acerca de lo que significa ser humano. A Leakey le habían impresionado los

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Un sistema para identificar todos los seres vivos 86–87 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Comportamiento animal 116–117

conocimientos de historia natural de Goodall en su primer encuentro en 1957, y le ofreció trabajo estudiando el comportamiento de los chimpancés. Como antropólogo y paleontólogo, Leakey defendía la teoría evolutiva, según la cual los seres humanos y los grandes simios –chimpancés, bonobos, gorilas y orangutanes– de la familia de los homínidos descienden de un antepasado común.

Atar cabos

El trabajo de campo de Leakey consistía en buscar el «eslabón perdido», o los fósiles de formas de transición entre ese antepasado común y los humanos. Los chimpancés no habían sido objeto de un estudio serio en su medio, estudio que Leakey consideraba que arrojaría luz sobre la evolución de los primeros seres humanos. Goodall, buena observadora y libre de ataduras académicas, era la persona ideal para la tarea. Como esperaba Leakey, ella aportó una perspectiva nueva de la teoría, y tenía el valor necesario para defender que los chimpancés y los humanos se parecían más de lo que se suponía. Hasta entonces, había consenso científico y popular en que la capacidad de ingeniar y fabricar herramientas es una marca de superioridad humana sobre el resto del reino animal. Los hallazgos de Goodall obligaron a los científicos a replanteárselo.



Un chimpancé atrapa termitas con una rama pelada: una herramienta modificada. Goodall fue la primera en registrar la capacidad de los chimpancés para la tecnología simple en Gombe.

Goodall estudió a una comunidad de chimpancés en un campamento del Parque Nacional Gombe Stream, en Tanzania, en la orilla oriental del lago Tanganica. Al vivir entre chimpancés para ser testigo de su comportamiento natural y no condicionado por la cautividad, Goodall fue una de las primeras personas que trabajó en el campo de la etología, en la que los biólogos observan a los animales en su entorno y estudian su comportamiento. Durante los primeros »

Jane Goodall



El primer chimpancé que vio Jane Goodall, nacida en Londres en 1934, fue Jubilee, un animal disecado de su padre. Se interesó desde muy joven por la conducta animal: una vez se escondió en un gallinero durante horas para ver a una gallina poner un huevo. Tras dejar la escuela a los dieciocho años, realizó diversos trabajos, y en 1957 fue a Kenia y conoció al paleoantropólogo Louis Leakey. Con el apoyo de este, en 1960, Goodall estableció una base de estudio en Gombe (Tanzania), donde estudió a los chimpancés hasta 1975. Su trabajo transformó radicalmente lo que se sabía de estos primates, y desafió las ideas preconcebidas sobre nuestro propio lugar en el mundo natural. En 1965 se doctoró en etología por la Universidad de Cambridge. Entre sus muchos premios está la Legión de Honor francesa, que recibió en 2006.

Obras principales

1969 *Mis amigos los chimpancés.*
1986 *The chimpanzees of Gombe: patterns of behaviour.*
2009 *Hope for animals and their world.*

Jane Goodall tomando notas en el Parque Nacional de Gombe, en 2006. La primatóloga pionera sigue comprometida de por vida con la protección de los chimpancés en peligro.

meses en el campamento, los chimpancés huían de Goodall, pero luego empezaron a ignorar su presencia.

Goodall pasó muchas horas observando a los chimpancés, manteniendo la distancia y tomando notas en silencio. Una mañana de noviembre de 1961, vio a un chimpancé al que llamaba David Greybeard sobre un montículo de termitas. Estaba introduciendo hojas de hierba en el termitero, sacándolas y llevándoselas a la boca. Cuando el chimpancé se fue, Goodall se acercó al lugar y vio tallos de hierba descartados en el suelo. Goodall introdujo uno en el montículo, y comprobó que las termitas lo mordían. Comprendió que el chimpancé había estado pescando termitas con los tallos y llevándoselas a la boca.

Por sus conversaciones con Leakey, Goodall sabía que era un hallazgo importante. También vio cómo los chimpancés modificaban ramitas quitándoles las hojas, y luego las usaban en los termiteros: no solo utilizaban herramientas; también las fabricaban.

Tecnología de chimpancé

Goodall fue testigo de nueve herramientas diferentes utilizadas por los chimpancés de la comunidad de Gombe. Los científicos cuestionaron los métodos de Goodall, y la ridiculizaron por poner nombre a los chimpancés en lugar de asignarles números, como muestra de falta de rigor en un trabajo de campo. Desde entonces, sin embargo, muchos otros estudios corroboraron sus hallazgos: se observó a chimpancés del Congo retirando la corteza de ramitas para atrapar termitas; y a los de Gabón, dirigirse al bosque equipados con un kit de cinco herramientas, entre ellas, un palo pesado para abrir colmenas de abejas y trozos de corteza para recoger la miel. En Senegal, se observó a partidas de caza de chimpancés con palos cuya punta afilaban mascando, y que usaban como lanzas para matar gálagos.

“

No veía al hombre
como ángel caído,
sino como simio alzado.
Desmond Morris
Zoólogo británico



Más semejantes que diferentes

Los etólogos toman comportamientos estudiados en distintas especies para formular generalizaciones aplicables a muchas. La idea de que el comportamiento animal pudiera servir de modelo del humano arrai-



Reconocemos que parecemos simios, pero raramente que lo somos.
Richard Dawkins
Biólogo evolutivo británico



gó en el trabajo de los etólogos de las décadas de 1950 y 1960, como Konrad Lorenz, Nikolaas Tinbergen y Karl von Frisch. Estudiando a los animales en su hábitat, vieron lo complejas que eran sus vidas. Empezaron a comprender interacciones sociales surgidas del instinto, además de comportamientos aprendidos, y esos estudios sirvieron de espejo en el que reflejar comportamientos humanos.

La creencia persistente de que los humanos son totalmente diferentes de otras especies quedó firmemente desautorizada por la cartografía de los genomas. Al completarse el mapa del genoma del chimpancé en 2005 –seguido por el de otros grandes simios–, el resultado era claro: los humanos comparten el 98,8 % de su ADN con los chimpancés, el 98,4 % con los gorilas, y el 97 % con los orangutanes. Son más las semejanzas que las diferencias entre humanos y grandes simios. Hay que tener en cuenta que estos porcentajes se basan en los genes que contienen las instrucciones para fabricar proteínas, que constituyen una parte muy pequeña del genoma humano (un 2 % aproximado). Es probable que lo que hace diferentes a los humanos de los chimpancés se encuentre en las regiones del ADN llamadas «ADN basura», así denominado porque antes se creía que carecía de función. Hoy se comprende que este ADN no codificante contiene información vital de cómo y cuándo se expresan los genes. Con todo, impresiona la semejanza del ADN de humanos y grandes simios.

Cazadores carnívoros

Durante sus estudios, Goodall vio también a los chimpancés cazar y comer carne. Como con la fabricación de herramientas, la idea de que los chimpancés fuesen depredadores carnívoros iba en contra de todo lo que se había supuesto hasta entonces. En un primer momento, algunos científicos lo consideraron un comportamiento aberrante, pero, al continuar los estudios y conocerse nuevos casos, pasó a ser un hecho establecido. Consta el consumo de carne en prácticamente todas las zonas donde se han estudiado chimpancés, desde los parques nacionales de Gombe y de los montes Mahale, en Tanzania, hasta el Parque Nacional de Taï, en Costa de Marfil. »

Evidencia cromosómica

Una prueba muy sólida en favor de un antepasado común puede verse comparando cromosomas. Los chimpancés (y los gorilas) tienen 24 pares de cromosomas; los humanos, 23. Los científicos evolutivos sostienen que, al separarnos del antepasado común, en los humanos se fusionaron dos cromosomas, y por eso tenemos un par menos que otros simios. Al extremo de cada cromosoma hay marcadores genéticos –o secuencias de ADN– llamados telómeros. En el centro hay una secuencia diferente, el centrómero. Si se han fusionado dos cromosomas, deberían verse regiones semejantes a los telómeros en el centro, además de en los extremos, y el cromosoma fusionado debería tener también dos centrómeros. Esto es justo lo que observaron los científicos al examinarlos. El cromosoma humano 2 parece ser la fusión de los cromosomas 2a y 2b de los chimpancés. Es prácticamente indudable que compartimos un antepasado con gorilas, chimpancés y bonobos.



El lenguaje corporal de un macho alfa recomienda no acercarse a los chimpancés que piden parte de su presa en el Parque Nacional de Gombe. Los colobos son sus presas más habituales.



Chimpancés huérfanos –cuyas madres han sido cazadas por su carne– caminando en un centro de conservación de África occidental.

Conservación de los chimpancés

Según el Instituto Jane Goodall, en Tanzania, el número de chimpancés en libertad se desplomó en el siglo pasado. Su población estimada era de un millón en 1900; actualmente hay menos de 300 000. La pérdida de hábitat por una población humana creciente y necesitada de espacio ha tenido un gran impacto, al igual que las industrias como la maderera y de la minería, que destruyen el hábitat y fragmentan las comunidades de chimpancés al construir carreteras a través de sus territorios. Las carreteras favorecen otra actividad dañina, la caza de animales salvajes por su carne, muy apreciada en África, incluida la de los grandes simios. Los cazadores pueden acudir directamente por carretera desde la ciudad. La protección de los chimpancés se basa en conservar el territorio y en generar concienciación a nivel local y global.

Tal comportamiento tiene implicaciones para la evolución humana. La ciencia se pregunta desde hace mucho por qué y cuándo los humanos empezaron a comer carne. Por los útiles líticos prehistóricos y las marcas en huesos, los paleontólogos saben que los antiguos homínidos usaban herramientas de piedra para descarnar huesos hace 2,5 millones de años, pero no se sabe qué comían entre esa fecha y hace 7 millones de años, cuando se cree que vivió el antepasado común de chimpancés y humanos.

Es probable que estos antiguos homínidos cazaran presas. No tenían caninos grandes como los chimpancés, pero estos no son necesarios para cazar y matar presas pequeñas. Los biólogos han observado que los chimpancés atrapan colobos (también primates) en los árboles, y los matan golpeándolos repetidamente contra el suelo. Los antiguos homínidos pudieron cazar y matar de modo similar antes de que hubiera las herramientas más antiguas conocidas.

Comportamiento cooperativo

Otro aspecto del comportamiento de los chimpancés al cazar que es similar al de los humanos es el elemento social. Aunque a veces los chimpancés cazan solos, la caza tiende a ser una actividad de grupo. Recorren el bosque de forma coordinada para rodear a las presas, y, tras la caza, comparten la comida. Así es como nuestros antiguos antepasados pudieron desarrollar el comportamiento cooperativo, factor que contribuyó a su éxito evolutivo.

Guerra de chimpancés

El campo de Gombe produjo la chocante revelación de que los chimpancés eran capaces de practicar la violencia, el asesinato y, en particular, la guerra, hasta entonces tenida por exclusiva de los humanos. Entre 1974 y 1978, Jane Goodall observó cómo una comunidad pacífica se dividía en dos grupos rivales que combatían en una guerra salvaje. A Goodall le resultó profundamente perturbadora la actividad de los chimpancés, que incluía emboscadas, secuestros y asesinatos sangrientos. El desencadenante de la guerra no estaba claro. Algunos estudiosos la atribuyeron a las estaciones de alimentación de Goodall en la zona, que pudieron congregar a chimpancés que de otro modo habrían permanecido separados. La respuesta al misterio llegó en marzo de 2018, cuando un equipo de investigación de las universidades Duke y de Arizona digitalizó las meticulosas hojas de verificación y notas de campo de Goodall entre 1967 y 1972, y las introdujo en un ordenador para analizar las relaciones sociales y alianzas de todos los machos. Se reveló que la fractura de la comunidad había tenido lugar dos años antes del estallido de la guerra, cuando un macho alfa llamado Humphrey encabezó el grupo, alienando con ello a otros dos machos dominantes,



Los chimpancés pueden luchar por el territorio para tener más recursos o parejas, pero algunos primatólogos creen que esta agresión no es natural, sino debida al impacto humano sobre su hábitat.



Estoy decidida a que mis bisnietos puedan ir a África y encontrar grandes simios en libertad.
Jane Goodall



Charlie y Hugh, que se marcharon con algunos otros chimpancés al sur. Los dos grupos se separaron cada vez más, alimentándose en distintas partes del bosque. Primero hubo escaramuzas ocasionales, y luego estalló la guerra. A lo largo de cuatro años, Humphrey y su séquito mataron a todos los machos del grupo sureño y tomaron su territorio, así como a las tres hembras supervivientes. Se cree que la guerra pudo deberse a la falta de hembras maduras en el grupo del norte. Las luchas por el poder, y por las hembras, parecen algo muy humano.

Lucha por los recursos

La larga guerra de la que fue testigo Goodall es el único conflicto plenamente documentado entre chimpancés, pero la violencia en comunidades de chimpancés se ha registrado en muchas ocasiones. Se ha observado a chimpancés robar y matar bebés de su especie, y atacar en grupo a un macho alfa. En las comunidades estudiadas en Uganda, los machos golpean rutinariamente a las hembras con las que se aparean. Se cree que la violencia de los chimpancés puede guardar relación con los recursos alimentarios y el consumo de carne. Cuando la fruta escasea, los chimpancés consumen más carne, y se vuelven más agresivos para obtener los recursos que necesitan.

Primos queridos

El vínculo entre escasez de alimento y agresión en el chimpancé común puede explicar por qué nuestro otro primo evolutivo entre los primates, el bonobo, o chimpancé pigmeo, es tan amante de la paz. Estos chimpancés pequeños y plácidos son omnívoros, pero viven en un entorno donde la fruta casi siempre abunda. Recolectan en grupo, y recurren al sexo para aliviar la tensión de las situaciones sociales. Los conflictos son raros en la sociedad de los bonobos, que es matriarcal, a diferencia de las comunidades dominadas por machos del chimpancé común.

Un experimento realizado en 2017 por investigadores de la Universidad Duke, en Durham (Carolina del Norte), mostró que los bonobos son, además, altruistas. Se puso a dos bonobos (desconocidos entre ellos) en dos habitaciones adyacentes (A y B) separadas por una valla, con una pieza de fruta suspendida sobre una de ellas (la B). El bonobo de la habitación A podía hacer que la fruta cayera en la habitación B, pero no podía recogerla él mismo. Se comprobó que siempre la hacía caer para que la alcanzase el otro, ayudando a un extraño sin obtener ventaja alguna.

También se ha registrado cómo las imágenes de un bonobo desconocido bostezando hacen bostezar a los bonobos, lo cual apunta a una capacidad para la empatía. Otros estudios muestran cómo los bonobos se reconfortan unos a otros cuando están angustiados. A diferencia del comportamiento «negativo» que comparten los humanos con los chimpancés, tales rasgos reflejan características humanas más loables, como la compasión. Comprender ese comportamiento en los bonobos podría arrojar luz sobre el desarrollo de la conducta social humana. ■



Los bonobos son primates muy sociales. Su capacidad para la empatía los hace menos agresivos, y eso podría vincularlos más estrechamente con los humanos que el chimpancé común.



TODA LA ACTIVIDAD CORPORAL DEPENDE DE LA TEMPERATURA

TERMORREGULACIÓN EN LOS INSECTOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Bernd Heinrich (n. 1940)

ANTES
1837 El británico George Newport observa que los insectos voladores pueden elevar su temperatura corporal por encima de la temperatura ambiente.

1941 Los daneses August Krogh y Eric Zeuthen concluyen que la temperatura de los músculos de vuelo de los insectos justo antes de despegar determina el rendimiento en el vuelo.

DESPUÉS
1991 El alemán Harald Esch describe cómo el calentamiento muscular sirve para incubar la puesta y defender la colonia, además de preparar el vuelo.

2012 El español José Ramón Verdú muestra con termografía infrarroja cómo algunas especies de escarabajo pelotero calientan o enfrían el tórax para mejorar el rendimiento en el vuelo.

Los insectos suelen considerarse de «sangre fría», o ectotermos. A diferencia de los mamíferos y de otros endotermos de «sangre caliente», animales que mantienen la temperatura corporal más o menos constante, la de los insectos es variable, y cambia en función de la del entorno. Sin embargo, a inicios del siglo XIX, el entomólogo británico George Newport descubrió que algunas polillas y abejas elevan la temperatura del tórax (la parte central del cuerpo, a la que se unen las patas y las alas) por encima de la del aire que les rodea con una flexión rápida de los músculos. Hoy se sabe que muchos insectos son heterotermos, es decir, mantienen temperaturas distintas en distintas partes del cuerpo, y en ocasiones muy superiores a la temperatura del ambiente.



Los músculos de vuelo de los insectos son, metabólicamente, el tejido más activo conocido.
Bernd Heinrich



La temperatura adecuada

El principal reto de los insectos consiste en calentarse lo suficiente para volar, evitando el sobrecalentamiento. En 1974, el entomólogo germano-estadounidense Bernd Heinrich, al haber comprendido que las adaptaciones térmicas de los insectos no difieren tanto como se creía de las de los vertebrados, explicó cómo las polillas, las abejas y los escarabajos controlan su propia temperatura.

La mayoría de los insectos voladores tiene tasas metabólicas superiores a las de otros animales; no obstante, debido a su pequeño tamaño, pierden el calor rápidamente, y, por tanto, no siempre pueden mantener una temperatura constante. La temperatura mínima que permite volar a un insecto varía de una especie a otra, mientras que la máxima está en el rango de los 40–45 °C. Para prevenir el sobrecalentamiento, los insectos transfieren calor del tórax al abdomen.

Muchos insectos voladores de mayor tamaño no podrían despegar si no pudieran elevar la temperatu-

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Ecofisiología 72–73 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Los organismos y su medio 166



Una mariposa ortiguera se alimenta sobre un diente de león. La mayoría de las mariposas cierran las alas para refrescarse, en un ejemplo de termorregulación conductual.

ra de sus músculos de vuelo. Para ello hacen vibrar los músculos que controlan los movimientos de subida y bajada de las alas, generando calor antes del despegue. Una vez en el aire, los músculos consumen gran cantidad de energía química, pero solo una parte sirve para batir las alas; el resto se convierte en más calor. Esto, combinado con el calor de la luz solar directa, supone un riesgo de sobrecalentamiento para los insectos voladores, y, para evitarlo, muchas especies tienen un sistema de intercambio de calor que transfiere el exceso de calor del tórax al abdomen, permitiendo al insecto mantener el tórax a una temperatura constante.

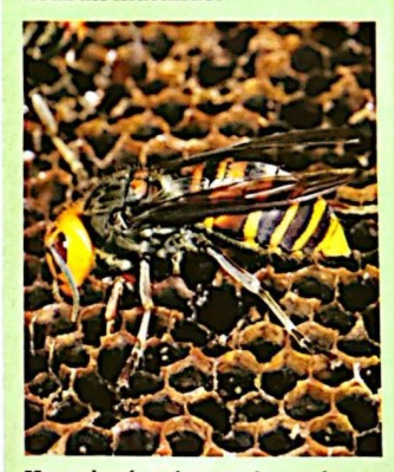
Técnicas diversas

Las mariposas controlan la temperatura corporal con el ángulo de apertura de las alas. Cuando necesitan calentarse, abrirlas completamente maximiza la cantidad de luz solar que reciben; para refrescarse, se refugian en la sombra o cierran las alas para recibir la menor cantidad de luz solar. Otros insectos usan métodos termorreguladores aún más llamativos. La temperatura corporal de los mosquitos aumenta cuando beben la sangre caliente de un mamífero. Para compensarlo, segregan gotas de fluido por el extremo del abdomen, que reducen la temperatura corporal al evaporarse. Los escarabajos peloteros forman bolas de estiércol donde las hembras ponen los huevos. Algunos pueden elevar la temperatura del tórax para hacer rodar bolas más pesadas.

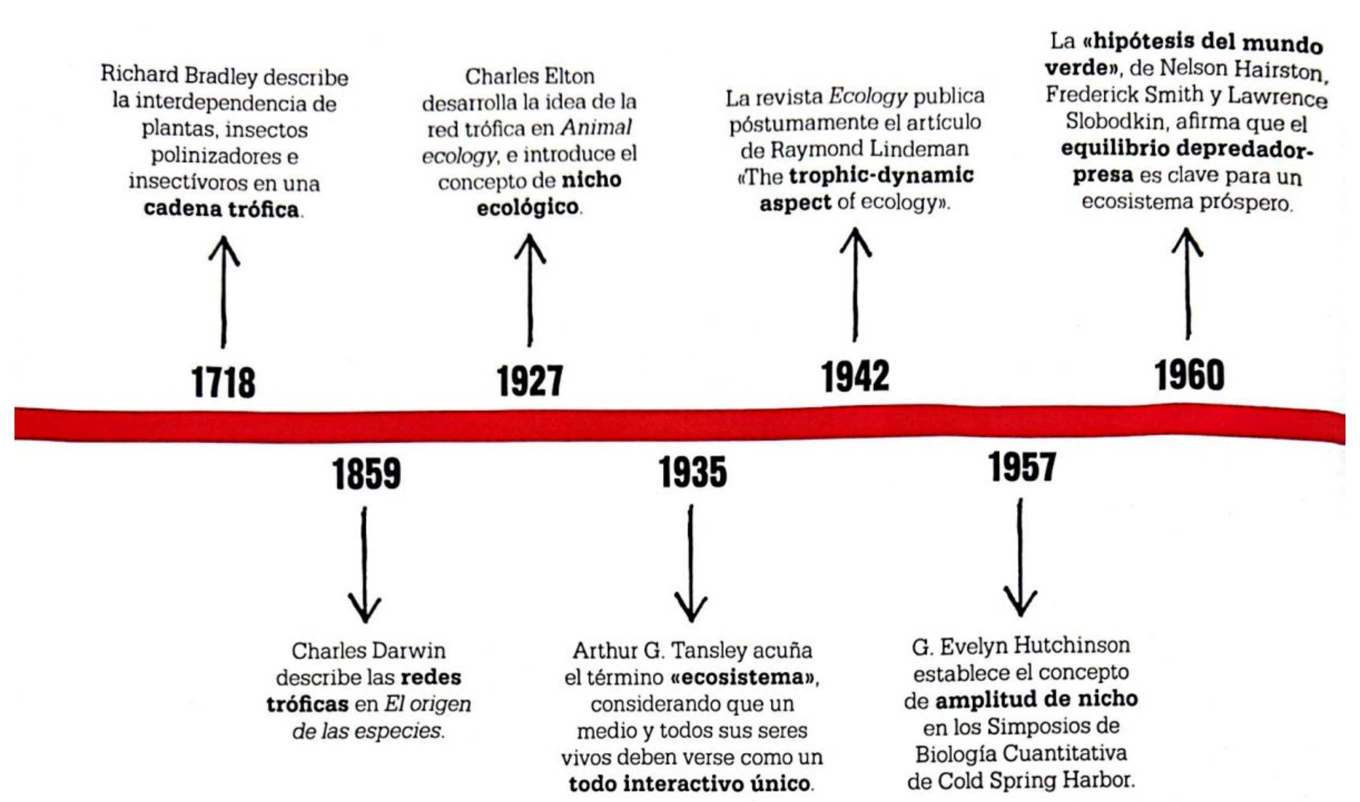
La gama de técnicas termorreguladoras muestra cómo las formas de vida evolucionan para adaptarse al entorno. También sirven de inspiración a la tecnología: los paneles solares orientados hacia el Sol captan la mayor cantidad de radiación solar, igual que las alas de las mariposas. ■

Regulación del calor

Las abejas melíferas controlan la temperatura de la colmena: si se calienta en exceso, la ventilan batiendo las alas para expulsar el aire caliente; si está demasiado fría, generan calor metabólico contrayendo y relajando en rápida sucesión los músculos de vuelo. También usan el calor como mecanismo de defensa. Los avispones gigantes japoneses, por ejemplo, son depredadores feroces de las abejas melíferas. Pueden matar rápidamente a un gran número de ellas, y son una amenaza para la colmena. El ataque de los avispones comienza matando abejas individuales en la entrada, pero las abejas melíferas se defienden con calor autogenerado. Ante el ataque de un avispón, estas forman una bola a su alrededor, haciendo vibrar las alas a fin de aumentar la temperatura. Como los avispones no toleran temperaturas superiores a los 46 °C, mientras que las abejas soportan casi los 48 °C, lo acaban matando.



Un avispón gigante japonés atacando las celdas de una colmena en el valle de Hase (Japón). Los avispones buscan devorar las larvas del interior.

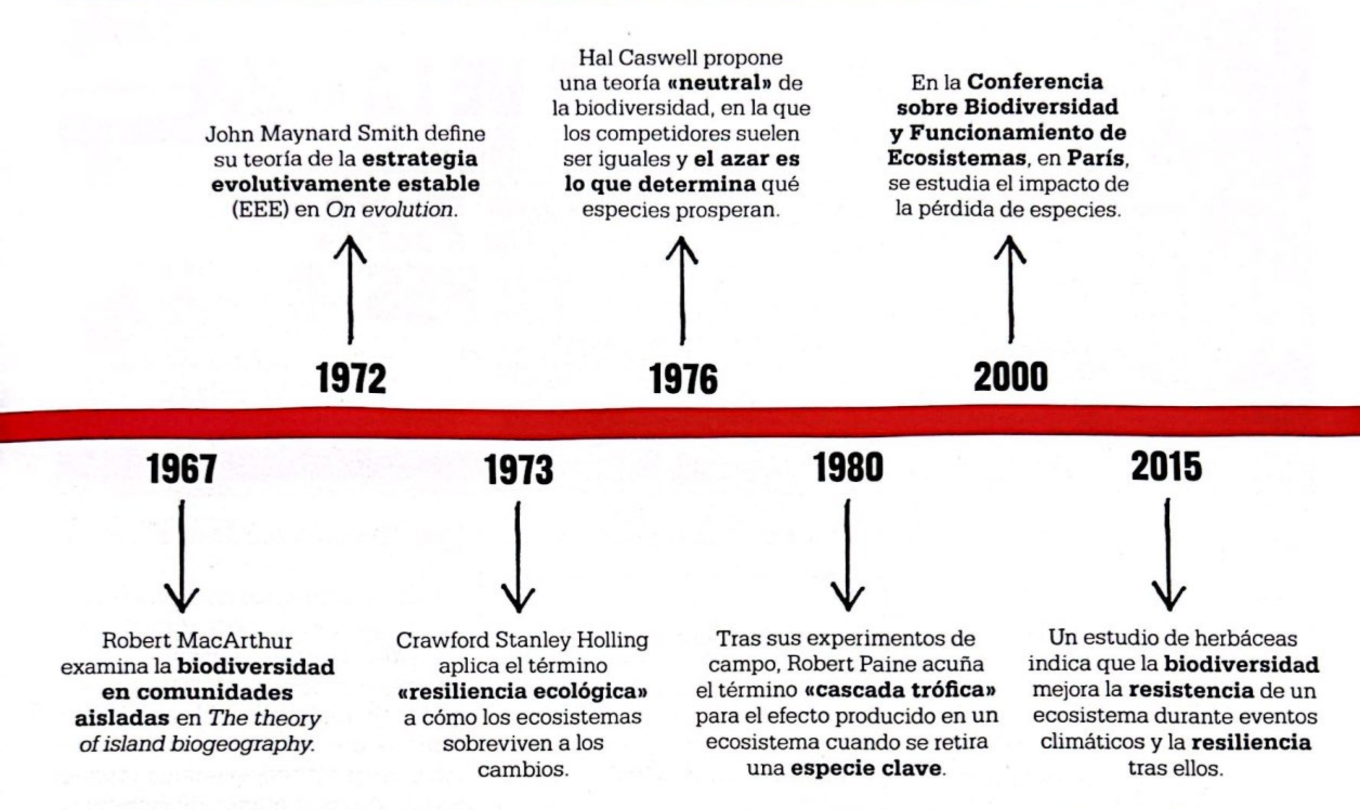


Cuando Aristóteles escribió sobre especies de plantas y animales que existían para otras especies, mostraba comprender en lo fundamental las cadenas alimenticias, al igual que otros incontables observadores desde la antigüedad. El erudito árabe Al Jahiz describió una cadena trófica de tres niveles en el siglo IX, como hizo el microscopista neerlandés Antonie van Leeuwenhoek, en 1717. El naturalista británico Richard Bradley publicó hallazgos más detallados sobre las cadenas tróficas en 1718; y, en 1859, Charles Darwin describió una «red de relaciones complejas» en la naturaleza en *El origen de las especies*. El concepto de red trófica, con múltiples interacciones predador-presa, fue ampliado por Charles Elton en su clásico *Animal ecology* (1927), a lo cual no tardó en seguir el concepto de ecosistema, cuando, en 1935, el botánico británico Arthur Tansley escribió que los organismos y su medio deben considerarse como un sistema físico. En su tesis doctoral, el ecólogo estadounidense Raymond Lindeman amplió dicha noción al plantear que un ecosistema se compone de procesos físicos, químicos y biológicos «activos dentro de una unidad espaciotemporal de cualquier magnitud».

También a Lindeman se debe la idea de los niveles tróficos, dependientes cada uno del precedente para su supervivencia. En 1960, el equipo formado por los estadounidenses Nelson Hairston, Frederick Smith y Lawrence Slobodkin publicó hallazgos sobre los factores que controlan las poblaciones animales en los distintos niveles tróficos. Identificaron tanto presiones ejercidas de arriba abajo, por los depredadores, como las ejercidas desde abajo, por las limitaciones a la disponibilidad de alimento. Veinte años más tarde, el ecólogo estadounidense Robert Paine, tras la retirada experimental de la estrella de mar ocre de una zona intermareal, escribió sobre el efecto de cascada trófica, es decir, cómo cambia un sistema cuando se retira una especie clave. La estrella de mar depredadora resultó ser una especie clave, con un papel crucial en su ecosistema.

Aislamiento insular

La fragmentación del hábitat es hoy un problema grave en la mayoría de los medios terrestres, ya que deja aislados a organismos especializados. Por eso es tan importante para la ecología el estudio de la biogeografía insular; la de las islas rodeadas por el océano, pero también la de las «islas» de hábitat diferenciado,



rodeadas de un medio muy diferente. En la década de 1960, en EE UU, Edward O. Wilson y Robert MacArthur descubrieron factores clave que determinan la diversidad de especies, la inmigración y la extinción en las islas. James Brown realizó un trabajo similar sobre poblaciones animales en parcelas aisladas de bosque en California. Tales estudios han servido para identificar las especies en mayor peligro de extinción debido al aislamiento.

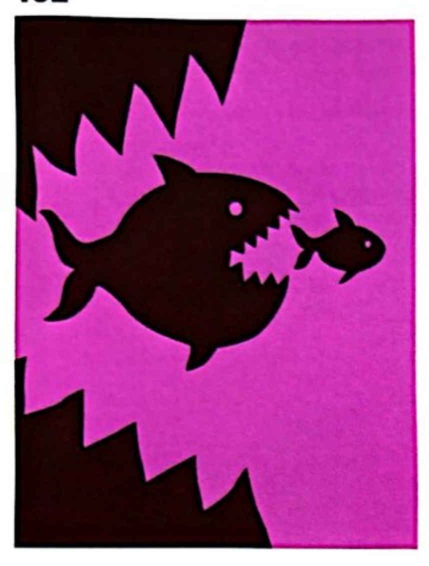
Estabilidad y resiliencia

Una gran aportación a la comprensión de la dinámica de ecosistemas fue el concepto de estrategia evolutivamente estable (EEE, o ESS, en inglés), introducido en la década de 1970 por el biólogo británico John Maynard Smith para describir la mejor estrategia de comportamiento para un animal en competencia con otros que viven en su vecindad. La estrategia depende de cómo se comportan los otros animales, y la determina el éxito genético del animal: si toma las decisiones equivocadas, no vivirá mucho, y no transmitirá sus genes. El equilibrio general entre las estrategias evolutivamente estables de todos los animales de un ecosistema se conoce como estado evolutivamente estable.

El ecólogo canadiense Crawford Stanley Holling introdujo la noción de resiliencia, o de cómo persisten los ecosistemas tras cambios traumáticos tales como incendios, inundaciones o deforestación. La resiliencia de un sistema se aprecia en su capacidad para absorber perturbaciones, o en el tiempo que tarda en volver a un estado de equilibrio después de un trauma.

Los ecólogos entienden hoy que los ecosistemas pueden tener más de un estado estable, y que los sistemas resilientes no siempre son buenos para la biodiversidad.

Con las poblaciones de muchas especies en declive o extinguiéndose localmente, los ecólogos están volviendo a centrar su atención en la resiliencia de los ecosistemas. Muchos, entre ellos el francés Michel Loreau, consideran que si se reduce la diversidad de un ecosistema, el sistema entero resistirá peor grandes impactos tales como los efectos del cambio climático. En la actualidad, Loreau y otros buscan una nueva teoría general que explique la relación entre biodiversidad y resiliencia de los ecosistemas, con el fin de comprender y combatir los efectos de los actuales desafíos ambientales. ■



CADA PARTE DE LA OBRA DE LA NATURALEZA ES NECESARIA PARA MANTENER AL RESTO

LA CADENA TRÓFICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Richard Bradley (1688–1732)

ANTES
Siglo IX El erudito Al Jahiz describe una cadena trófica de tres niveles, con materia vegetal, ratas, serpientes y aves.

1717 El neerlandés Antonie van Leeuwenhoek observa cómo los eglefinos comen camarones, y los bacalaos, eglefinos.

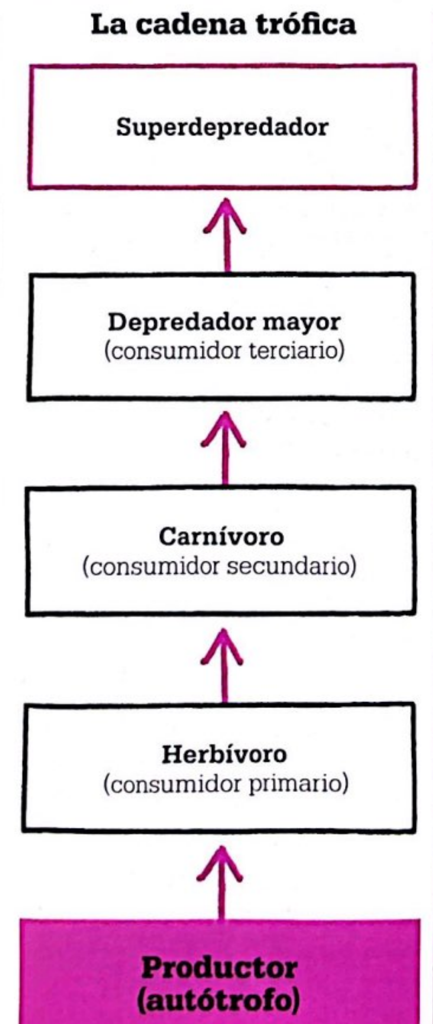
DESPUÉS
1749 El taxónomo sueco Carlos Linneo introduce la idea de competencia.

1768 El naturalista neerlandés John Bruckner introduce la noción de red trófica.

1859 Charles Darwin escribe sobre redes tróficas en su obra *El origen de las especies.*

1927 El británico Charles Elton esboza en *Animal ecology* los principios del comportamiento animal, cadenas tróficas incluidas.

La cadena trófica



Todos los animales deben comer otros seres vivos para obtener los nutrientes que necesitan para crecer y funcionar. Una cadena trófica muestra la jerarquía alimentaria de los distintos animales de un hábitat. Mostraría, por ejemplo, que los zorros comen conejos, pero que los conejos nunca comen zorros. Aunque hubiera nociones anteriores de una jerarquía de animales vinculados en una cadena trófica, el naturalista británico Richard Bradley aportó nuevos detalles a la idea en su obra *New improvements in planting and gardening* (1718). Observó que cada planta tenía una serie de insectos propios que viven de ella, y proponía que los insectos a su vez recibían la atención de organismos de «menor rango» que se alimentaban de ellos. De este modo, creía, todos los animales dependen unos de otros en una cadena que se autoperpetúa.

Productores y consumidores

El concepto moderno de cadena trófica explica que algunos organismos, los productores o autótrofos, producen su propio alimento. Las plantas y la mayoría de las algas pertenecen a esta categoría, empleando normalmente la energía de la luz solar para convertir agua y dióxido de carbono

Véase también: Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Mutualismos 56–59 ▪ Especies clave 60–65 ▪ Teoría del forrajeo óptimo 66–67 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Cascadas tróficas 140–143 ▪ Resiliencia ecológica 150–151



Cada especie tiene un lugar específico en la naturaleza, en la geografía y en la cadena trófica.
Carlos Linneo



en glucosa, a la vez que liberan oxígeno. El proceso, llamado fotosíntesis, es el primer paso en la creación de alimento. En lugares sin luz solar, los organismos que producen su propio alimento se conocen como quimiótrofos. Los del océano profundo, por ejemplo, obtienen la energía necesaria de las sustancias químicas que emiten las fuentes hidrotermales.

Los animales que comen productores y los que comen otros animales son consumidores, o heterótrofos, y puede haber dos, tres o más niveles de ellos en cualquier parte dada de la cadena trófica; pero siempre hay un productor en la base, y todos los niveles superiores son de consumidores. Los animales que solo comen plantas son herbívoros, o consumidores primarios, como bóvidos, conejos, mariposas y elefantes. Los que comen solo otros animales son carnívoros, o consumidores secundarios, como tordos, libélulas y erizos. A su vez, los consumidores secundarios pueden ser comidos por depredadores mayores, o consumidores terciarios, como los zorros, felinos menores y aves de presa. Los animales en la cima de su cadena trófica son superdepredadores, entre los que se cuentan tigres, orcas y águilas reales, que no son presa de otros animales.



Un superdepredador como el tiburón cobrizo no tiene depredadores naturales, y encuentra una cantidad enorme de sardinas en las aguas oceánicas templadas próximas a Sudáfrica.

La cadena trófica no se rompe cuando mueren las plantas y los animales. Los detritívoros consumen los restos, reciclando nutrientes y energía para la siguiente generación de productores.

Redes tróficas

Los estudiosos posteriores a Bradley consideraron que los animales no formaban meras cadenas tróficas, sino redes tróficas mayores y más complejas que comprenden todas las cadenas tróficas de un lugar dado. La idea la postuló el naturalista neerlandés John Bruckner en 1768, y la adoptó Charles Darwin, quien se refirió a la variedad de relaciones alimenticias entre especies como una «red de relaciones complejas». ■

Richard Bradley

Nacido hacia 1688, el botánico británico Richard Bradley atrajo la atención de un mecenas tras escribir *Treatise of succulent plants* a los veintidós años de edad. Sin formación universitaria, fue elegido miembro de la Royal Society y luego primer catedrático de botánica en Cambridge.

Sus amplios intereses abarcaron la germinación de hongos por esporas y la polinización de las plantas. En algunos aspectos estaba adelantado a su tiempo. Así, creía que las infecciones eran causadas por seres visibles solo al microscopio. Sus estudios de la productividad de madrigueras de conejos y lagos de peces le llevaron a teorizar sobre relaciones predador-presa. Murió en 1732.

Obras principales

1716–1727 *The history of succulent plants.*
1718 *New improvements in planting and gardening.*
1721 *A philosophical account of the works of nature.*

TODOS LOS ORGANISMOS SON FUENTES POTENCIALES DE ALIMENTO PARA OTROS

EL ECOSISTEMA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Arthur Tansley
(1871–1955)

ANTES
1864 George Perkins Marsh, ambientalista estadounidense, publica la obra *Man and nature*, donde sugiere el concepto de ecosistema.

1875 El geólogo austriaco Eduard Suess propone el término «biosfera».

DESPUÉS
1953 Los ecólogos estadounidenses Howard y Eugene Odum desarrollan un enfoque de sistemas para el flujo de energía en los ecosistemas.

1956 Paul Sears, ecólogo estadounidense, destaca el papel de los ecosistemas en el reciclaje de nutrientes.

1970 Paul Ehrlich y Rosa Weigert advierten de la interferencia humana potencialmente destructiva en los ecosistemas.

El biólogo británico Arthur Tansley fue el primer científico en insistir en que había que considerar las comunidades de organismos en un área dada en un contexto más amplio que incluyera los elementos no vivos. Tansley mantenía que, en una región dada, los seres vivos y su entorno geofísico forman juntos una entidad única e interactiva. Tomando prestado un concepto de la ingeniería, Tansley vio esta red de interacciones como un sistema dinámico, físico. Por sugerencia de su colega Arthur Clapham, Tansley acuñó el término «ecosis-

Véase también: Ecología animal 106–113 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ El flujo de energía en los ecosistemas 138–139 ▪ La hipótesis Gaia 214–217 ▪ Bucles de retroalimentación ambiental 224–225 ▪ Servicios ecosistémicos 328–329



En el arrecife coralino tropical, uno de los ecosistemas más diversos, viven peces, tortugas marinas, crustáceos, moluscos y esponjas, además de coral.

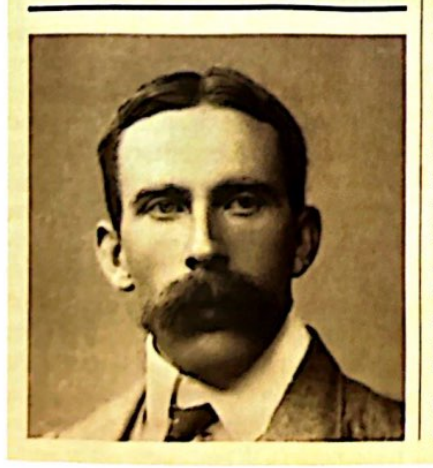
tema» para darle nombre. La idea llevaba mucho tiempo en desarrollo antes de que Tansley publicara su influyente trabajo sobre el tema en 1935. Ya en 1864, el ambientalista George Perkins Marsh, en su libro *Man and nature*, había identificado «los bosques, las aguas y la arena» como hábitats distintos, y había estudiado cómo la actividad humana podía perturbar la relación entre dichos hábitats y los animales y las plantas que en ellos viven.

Sistemas interconectados

En el siglo xx había arraigado ya la idea de que los medios mencionados y otros podían entenderse como entidades distintas, con interacciones propias entre sus respectivos elementos vivos e inertes. En 1916, el ecólogo estadounidense Frederic Clements amplió la idea en su trabajo sobre la sucesión de las plantas, refiriéndose a una «comunidad» de vegetación como un ente único, y usando el término «bioma» para describir el complejo entero de organismos que habitan una región dada.

En la concepción de Tansley, los ecosistemas se componen de elementos bióticos (vivos) y abióticos (no vivos) como energía, agua, nitrógeno y minerales del suelo, esenciales para el funcionamiento del sistema en su conjunto. Los componentes bióticos de un ecosistema no solo interactúan entre sí, sino también con las partes abióticas. Así, en cualquier ecosistema dado, los organismos se adaptan a los »

Arthur G. Tansley



Arthur Tansley, socialista fabiano, librepensador y ateo, fue uno de los ecólogos más influyentes del siglo xx. Nacido en Londres en 1871, estudió biología en la University College de Londres, de la que luego fue profesor. En 1902 fundó la revista *New Phytologist*, y más tarde estableció la British Ecological Society, de cuya revista *Journal of Ecology* fue editor fundador. En 1923 interrumpió su actividad docente para estudiar psicología con Sigmund Freud en Viena, y posteriormente ocupó la cátedra sherardiana de Botánica en la Universidad de Oxford.

Tansley se jubiló en 1937, pero mantuvo un interés especial por la conservación. Fue nombrado primer presidente de The Nature Conservancy, de Reino Unido, en 1950; murió cinco años después.

Obras principales

1922 *Types of British vegetation.*
1922 *Elements of plant ecology.*
1923 *Practical plant ecology.*
1935 «The use and abuse of vegetational terms and concepts», *Ecology.*
1939 *The British islands and their vegetation.*

elementos tanto biológicos como físicos del medio. Los distintos tipos de ecosistema pueden definirse por sus medios físicos. Hay cuatro categorías de ecosistema: terrestres, de agua dulce, marinos y atmosféricos. Estos pueden subdividirse a su vez en varios tipos, en función de sus diferentes medios físicos y de la biodiversidad que contienen. Los ecosistemas terrestres, por ejemplo, se pueden subdividir en desiertos, bosques, praderas, taigas y tundras.

Retroalimentación dinámica

La percepción más importante de Stanley fue que estas comunidades separadas de componentes vivos y no vivos conforman sistemas dinámicos. En un ecosistema terrestre, por ejemplo, los organismos interactúan para reciclar materia: las plantas absorben dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y nutrientes del suelo para crecer, al respirar liberan a la atmósfera oxígeno, sustento de la vida, y proporcionan alimento a los animales. Los excrementos de estos y su materia muerta también liberan carbono, aportando material que descomponen bacterias y hongos, lo cual, a su vez, aporta nutrientes al suelo para las plantas.

Arthur Tansley mantenía también que estos procesos internos de un ecosistema se ajustan a lo que llamó la «gran ley universal del equilibrio». Al tratarse de procesos autorregulados, tienen una tendencia natural a la estabilidad. Los ciclos de un ecosistema contienen bucles de retroalimentación que corrigen las fluctuaciones que se aparten del estado de equilibrio. Cada ecosistema se encuentra en una zona determinada, con características únicas de su medio, y se comporta como un sistema independiente y autorregulado. El conjunto de los ecosistemas del globo forma lo que el científico austriaco Eduard Suess llamó la biosfera: la suma de todos los ecosistemas.



Un pequeño lago glaciar del Distrito de los Lagos, en Inglaterra. Cada lago tiene un ecosistema que varía en función de muchos factores, entre ellos la riqueza en nutrientes del agua.

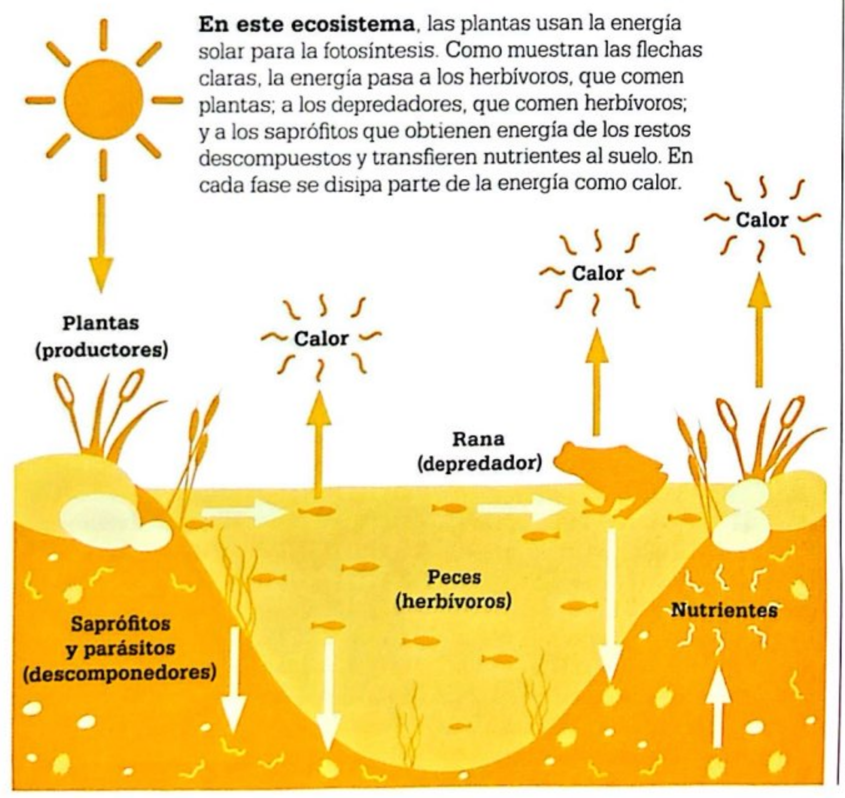
Factores externos

Varios factores externos como el clima y la conformación geológica del medio circundante afectan a un ecosistema. Una fuerza externa que interviene en todos los ecosistemas proviene del Sol. La energía que aporta permite la fotosíntesis y la captación de CO_2 de la atmósfera, y parte de ella se distribuye por el ecosistema y por la cadena trófica, mientras que otra parte se disipa en forma de calor.

Otros factores externos, en cambio, pueden surgir de modo inesperado y ejercer presión sobre los ecosistemas. Todos los ecosistemas se ven sujetos a perturbaciones externas periódicas, y deben pasar después por un periodo de recuperación. Ejemplos de tales perturbaciones son las tormentas, los terremotos, las sequías y otros fenó-

La transferencia dinámica de energía

En este ecosistema, las plantas usan la energía solar para la fotosíntesis. Como muestran las flechas claras, la energía pasa a los herbívoros, que comen plantas; a los depredadores, que comen herbívoros; y a los saprófitos que obtienen energía de los restos descompuestos y transfieren nutrientes al suelo. En cada fase se disipa parte de la energía como calor.





No hay desperdicio en un ecosistema funcional. Todos los organismos, muertos o vivos, son fuente potencial de alimento para otros.

G. Tyler Miller

Autor científico



menos naturales, pero cada vez más se deben a la actividad humana, con la destrucción de hábitats naturales por la deforestación, la urbanización, la contaminación y los efectos acumulativos del cambio climático antropogénico. Los seres humanos pueden ser también responsables de la introducción de especies invasivas. Sin tales factores externos, los ecosistemas mantendrían un estado de equilibrio y una identidad estable.

Resistencia y resiliencia

Los ecosistemas tienen a menudo la resistencia suficiente como para soportar perturbaciones externas naturales y conservar el equilibrio. Algunos las resisten mejor que otros, y se han adaptado a las perturbaciones habitualmente asociadas a su medio. A algunos ecosistemas de bosque, por ejemplo, los incendios periódicos causados por tormentas eléctricas no les causan más que un desequilibrio menor.

Incluso cuando la perturbación externa causa trastornos graves, algunos ecosistemas tienen una capacidad de recuperación a la que se ha llamado resiliencia. Otros ecosistemas son más frágiles, y pueden no recuperar el equilibrio tras una perturbación.

Se suele considerar que la resistencia y resiliencia de un ecosistema guardan relación con su biodiversidad. Si, por ejemplo, hay una sola especie de planta que realiza una función determinada en el sistema, y esa especie no resiste las heladas, un invierno anormalmente frío podría afectarla lo suficiente como para tener un impacto grave sobre el sistema en su conjunto. Si, en cambio, hay varias especies con ese papel en el sistema, es más probable que alguna sea resistente a la perturbación.

El factor humano

Algunas perturbaciones pueden ser tan graves que resulten catastróficas para un ecosistema, dañándolo más allá de su capacidad para recuperarse, y causando por tanto un cambio permanente en su identidad, o incluso su desaparición. Lo que se teme es que muchas perturbaciones debidas a la actividad humana tengan el potencial de causar tales daños permanentes, especialmente cuando suponen la completa destrucción de hábitat y la consiguiente pérdida de biodiversidad. Algunos mantienen, además, que la influencia humana ha creado una nueva categoría de sistemas ecológicos, los «tecnoecosistemas». Los estanques de enfriamiento construidos junto a las centrales nucleares, por ejemplo, se han convertido en ecosistemas para organismos acuáticos.

La relación entre humanos y ecosistemas naturales no es siempre negativa. En los últimos años, los datos científicos han alimentado la conciencia pública de los beneficios que aportan los ecosistemas a la humanidad, entre ellos, alimento, agua, nutrientes y aire limpio, así como medicamentos y hasta mecanismos de gestión del clima. Hoy es creciente el compromiso de muchos gobiernos de todo el mundo con un uso responsable y sostenible de tales beneficios. ■

El Proyecto Edén, en Cornualles (Reino Unido), simula un ecosistema de pluvisilva bajo la cúpula de un invernadero gigante. Los paneles se inclinan para absorber abundante luz y energía térmica.





UNA VASTA RED DE PROCESOS SOSTIENE LA VIDA

EL FLUJO DE ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Raymond Lindeman
(1915–1942)

ANTES
1913 El zoólogo Victor Shelford crea las primeras redes tróficas ilustradas.

1920 Frederic Clements describe cómo se asocian especies de plantas en comunidades.

1926 El geoquímico ruso Vladímir Vernadski observa el reciclaje de sustancias químicas entre lo vivo y lo no vivo.

1935 Arthur Tansley desarrolla el concepto de ecosistema.

DESPUÉS
1957 Eugene Odum, ecólogo estadounidense, usa elementos radiactivos para cartografiar cadenas tróficas.

1962 En *Primavera silenciosa*, Rachel Carson alerta sobre la acumulación de pesticidas en las cadenas tróficas.

En 1941, Raymond Lindeman, un estudiante estadounidense, envió el capítulo final de su tesis doctoral para su publicación en la prestigiosa revista *Ecology*. «The trophic-dynamic aspect of ecology» trataba de la relación entre las cadenas tróficas y los cambios a lo largo del tiempo en una comunidad de especies.

Lindeman había pasado cinco años estudiando las formas de vida en un lago de las ciénagas de Cedar Creek, en Minnesota, y estaba interesado sobre todo en los cambios del lago a medida que, de año en año, el hábitat acuático cedía gradualmente paso a la tierra. Lindeman se doctoró, pero su trabajo, considerado demasiado teórico, fue rechazado en un principio por *Ecology*.

Lindeman había tomado muestras de todo lo que había en el lago, desde plantas acuáticas y plancton de algas microscópicas hasta los gusanos, insectos, crustáceos y peces que se alimentaban y dependían unos de otros para existir. Lindeman hacía hincapié en que la comunidad de organismos no se podía comprender adecuadamente por sí misma, sino solamente en el

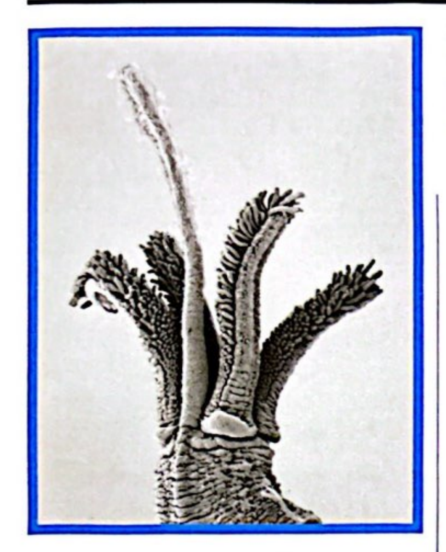
Los productores (plantas y algas) dependen de la **energía** del **Sol** y los nutrientes de la **materia orgánica descompuesta**.

→ **Los consumidores primarios** dependen de la **abundancia de plantas y algas**.

↓ **Los consumidores secundarios** dependen de la abundancia de **consumidores primarios**.

← **Una vasta red de procesos sostiene la vida.**

Véase también: Nichos ecológicos 50–51 ▪ Efectos no consuntivos de los depredadores sobre sus presas 76–77 ▪ La cadena trófica 132–133



Los *Osedax* son anélidos del fondo marino que se alimentan de los restos de animales como las ballenas, usando «raíces» que descomponen los huesos para reciclar sus nutrientes.

contexto de su entorno. Los organismos vivos (bióticos) y componentes no vivos (abióticos), como el aire, el agua y los minerales del suelo, están vinculados por ciclos de nutrientes y flujos de energía. El sistema entero –el ecosistema– es la unidad ecológica central.

Productores y consumidores

El estudio de Lindeman mostraba cómo un ecosistema se alimenta de un flujo de energía que va de unos organismos a otros. Los organismos pueden agruparse en varios niveles tróficos, desde los productores (plantas y algas), que absorben energía de la luz solar para producir alimento, hasta los consumidores (animales). Los consumidores primarios son los herbívoros; los secundarios, los que se alimentan de herbívoros. Cada nivel trófico depende del precedente para sobrevivir. A la vez, agentes tales como bacterias y hongos descomponen la materia muerta que se acumula en cada fase, y la reciclan en forma de nutrientes para el consumo de plantas y algas.

Lindeman mostró también cómo parte de la energía de cada nivel trófico se pierde en forma de desechos, o se convierte en calor al respirar los seres vivos. Combinando los resultados de su propio estudio con datos de otras fuentes muy diversas, logró representar el sistema tal como funcionaba en las ciénagas de Cedar Creek.

El ecólogo británico G. Evelyn Hutchinson, considerado uno de los padres fundadores de la ecología moderna, fue el mentor de Lindeman en la Universidad de Yale. Reconoció la importancia del trabajo de su alumno para el desarrollo futuro de la ecología, y se esforzó por lograr que se publicara su trabajo. Lindeman, cuya salud había sido siempre frágil, murió trágicamente de cirrosis a los veintisiete años, en 1942, solo cuatro meses antes de que se publicara al fin su trabajo trófico-dinámico, hoy un clásico en su campo. ■



[…] las comunidades biológicas se pueden expresar como redes o canales por los cuales la energía fluye y se disipa […].

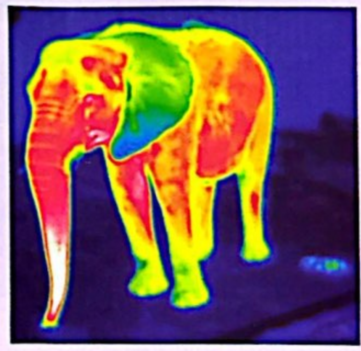
G. Evelyn Hutchinson



Medir la productividad

La teoría trófico-dinámica contribuyó a aclarar la noción de productividad de los ecosistemas, que los ecólogos venían definiendo de forma vaga hasta aquel momento. La productividad de una planta o animal se mide por su crecimiento en materia orgánica, o biomasa, que nunca equivale a la energía recibida por el organismo: la conversión de energía solar en hojas, en el caso de las plantas, o del alimento en tejido muscular, en el de los animales, nunca es eficiente al ciento por ciento. Parte se libera en forma de calor, la mayoría del cual se pierde por la respiración, un aspecto clave del metabolismo de todos los seres vivos.

Los animales de sangre caliente pierden mucho calor cuando su temperatura corporal es muy superior a la del entorno, y todos los animales pierden energía al excretar orina. Además, los animales no digieren todo el alimento en el intestino; el material expulsado en forma de heces representa energía química no utilizada.



Esta imagen térmica de un elefante muestra cómo el animal pierde calor. Tanto su temperatura corporal como la de sus heces es superior a la del entorno.

EL MUNDO ES VERDE

CASCADAS TRÓFICAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Nelson Hairston (1917–2008)

ANTES
1949 Aldo Leopold publica *A Sand County Almanac* para alertar del impacto ecológico de la caza del lobo sobre la vegetación de montaña.

DESPUÉS
1961 El ecólogo marino estadounidense Lawrence Slobodkin publica *The growth and regulation of animal populations*, manual ecológico clave.

1980 Robert Paine describe el efecto de cascada trófica al retirarse los depredadores de un sistema intermareal.

1995 La reintroducción del lobo gris en el Parque Nacional de Yellowstone produce cambios en el ecosistema.

Poco después del final de la Segunda Guerra Mundial, el ecólogo Aldo Leopold, uno de los mayores expertos en gestión del medio ambiente y vida salvaje de EE UU, se enfrentó a la opinión favorable a la erradicación del lobo por ser una amenaza para el ganado. En *A Sand County Almanac* escribió sobre el efecto destructivo que tendría la eliminación de este superdepredador sobre el resto del ecosistema: causaría una presión excesiva de los ciervos sobre la vegetación de las laderas. Leopold fue uno de los primeros en describir una cascada trófica, aunque no empleara el término.

Los depredadores mantienen un equilibrio en la red trófica al regular la población de otros animales. Al atacar y comer presas, afectan al

Véase también: Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ El flujo de energía en los ecosistemas 138–139 ▪ Estado evolutivamente estable 154–155 ▪ Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157



Las estrellas de mar ocres se alimentan de mejillones y lapas. En un experimento famoso, Robert Paine las retiró de las pozas de marea para ver el efecto sobre el resto de la red trófica.

número de las mismas, así como a su comportamiento, pues las presas huyen de la presencia de los depredadores. El impacto de un depredador se extiende más allá del nivel trófico siguiente, afectando a la población de la fuente de alimento de la presa. En esencia, al controlar la densidad de población y el comportamiento de sus presas, los depredadores benefician indirectamente y favorecen la abundancia de la presa de su presa.

Los ecólogos llaman cascada trófica a la interacción indirecta que se da entre niveles tróficos. Por definición, una cascada trófica debe atravesar al menos tres niveles tróficos. Se dan cascadas de cuatro y cinco niveles, pero son menos frecuentes.

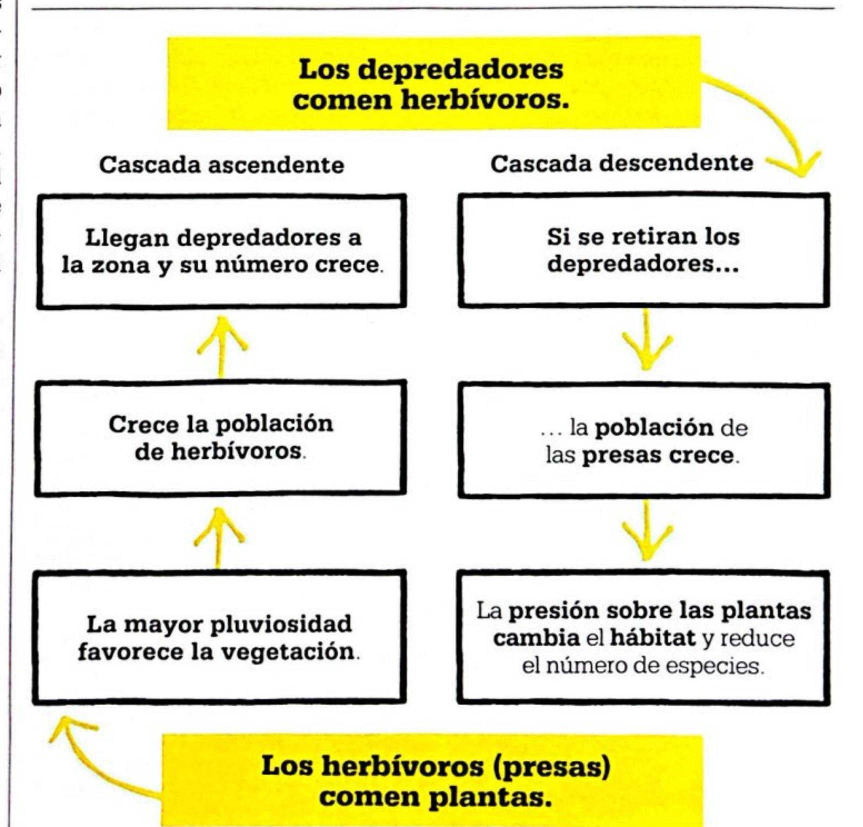
Factores de control

En 1960, el ecólogo estadounidense Nelson Hairston y sus colegas Frederick Smith y Lawrence Slobodkin publicaron el trabajo «Community structure, population control, and competition» («Estructura de comunidades, control de población y competencia»), en el que analizaban los factores que controlan las poblaciones de animales en los distintos niveles tróficos. Concluyeron que las poblaciones de productores, carnívoros y descomponedores están limitadas por sus respectivos recursos. En cada uno de estos niveles tróficos se da la competencia entre especies. También observaron que las poblaciones de herbívoros rara vez son limitadas por las plantas disponibles; suelen limitarla los depredadores, lo cual hace menos probable que compitan con otros herbívoros por los mismos recursos. El trabajo destacaba la importancia del papel de las fuerzas descendentes (depredación) y ascendentes (disponibilidad de alimentos).

En 1980, el ecólogo estadounidense Robert Paine fue el primero en emplear el término «cascada trófica», al describir cambios en redes tróficas causados por la retirada experimental de las estrellas de mar depredadoras de la zona intermareal en el estado de Washington. El concepto de cascada trófica es generalmente aceptado hoy, aunque el debate continúa acerca de su alcance y dimensiones.

Cascadas de arriba abajo

Una cascada descendente queda de manifiesto cuando se interrumpe una cadena trófica retirando un superdepredador. El ecosistema puede seguir funcionando pese al ajuste de la composición de las especies, pero la retirada de una sola especie puede causar también su colapso. Se cree que »



una cascada trófica fue la responsable de la desaparición de las marismas en la costa sur de Nueva Inglaterra (EE UU), donde la pesca recreativa redujo tanto la población de peces predatorios que el número de cangrejos herbívoros aumentó de forma drástica. El consiguiente incremento en el consumo de vegetación de las marismas por los cangrejos tuvo un efecto dominó sobre otras especies que dependían de la misma.

Las cascadas tróficas se pueden deber también a la introducción y difusión de especies no nativas, como cuando los cangrejos del barro omnívoros, nativos de las costas de América del Norte, empezaron a abundar en el Báltico en la década de 1990. Los cangrejos, especie clave de muchas redes tróficas costeras, se alimentan de comunidades del fondo marino, o bénticas (bivalvos, gasterópodos y otros invertebrados pequeños), con una eficiencia devastadora, creando una potente cascada de arriba abajo. El aumento de la población de cangrejos en el Báltico, donde no hay depredadores equivalentes, causó una caída drástica de las especies de invertebrados bénticos, y esta, a su vez, produjo un aumento de los nutrientes flotantes que benefició al fitoplancton a costa de las especies del lecho marino. El efecto neto de la llegada de los cangrejos fue la transferencia de nutrientes del lecho marino al agua entre los sedimentos y la superficie, y la degradación del ecosistema.

Cascadas de abajo arriba

Si se retira una planta –un productor primario– de un ecosistema, el resultado puede ser una cascada ascendente. Si una enfermedad fúngica acaba con la hierba, desaparecerá también la población de conejos que depende de ella. A su vez, los depredadores que comen conejos morirán de hambre o se verán obligados a marcharse, con el posible colapso del ecosistema entero. De modo inverso, si la repoblación o las medidas de conservación favorecen la abundancia y variedad de la vida vegetal, esta atraerá más herbívoros (incluidos los polinizadores que ayudan a reproducirse y difundirse a las plantas), y, con ello, a más depredadores.

En el modelo de abajo arriba, las respuestas de los herbívoros y de sus depredadores a la mayor variedad de plantas se dan en la misma dirección: más plantas dan sustento a más herbívoros y a más depredadores. En las de arriba abajo, en cambio, es el mayor número de depredadores el que conlleva la presencia de menos herbívoros y de una mayor variedad de plantas.



Igual que la manada de ciervos teme mortalmente a los lobos, la montaña vive con miedo a los ciervos.
Aldo Leopold

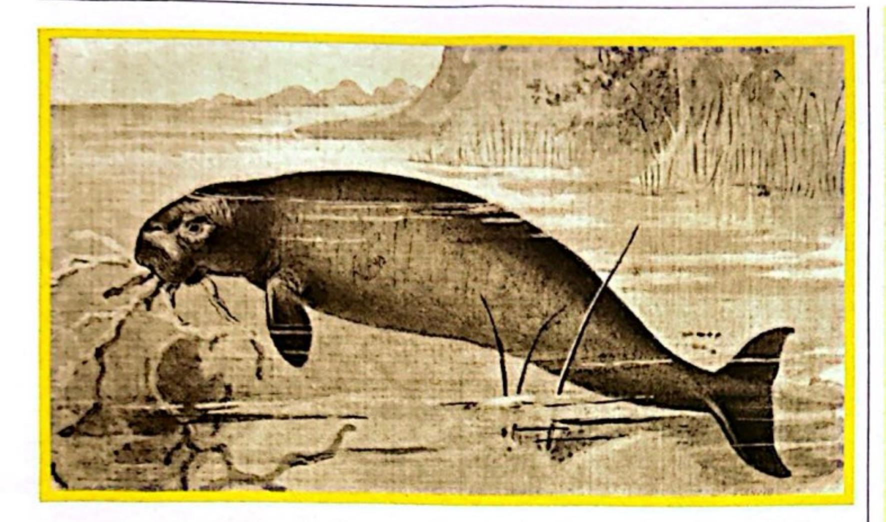


Escarabajos, hormigas y polillas

Estudiar las cascadas tróficas en sistemas de cuatro niveles es más difícil, pues los depredadores del nivel más alto pueden comer depredadores del nivel inferior y herbívoros del siguiente nivel más bajo, por lo que las relaciones se vuelven más complejas. En 1999, los investigadores de cascadas tróficas en la pluvisilva de Costa Rica sortearon el problema estudiando un sistema de tres niveles tróficos de invertebrados, en el que el mayor depredador –un escarabajo clérido– se alimentaba de las hormigas depredadoras del nivel inferior, pero no de los herbívoros del siguiente. Al aumentar el número de escarabajos predatorios en el área de estudio, la población de hormigas predatorias cayó drásticamente. Esto redujo la



El arbusto lupino amarillo de California es invasivo, y puede perturbar el ecosistema causando niveles altos de nitrógeno que atraen a especies no nativas.



La vaca marina de Steller fue un sirénido gigante que descubrió Georg Steller en 1741. Su extinción es causa de debate: ¿fue cazada hasta su extinción o desapareció su fuente de alimento?

presión sobre docenas de especies de invertebrados herbívoros, que comieron mucha más vegetación, y la superficie de hoja de las plantas del estudio quedó reducida a la mitad.

No todas las especies que participan en una cascada trófica son obvias o visibles. Algunas son minúsculas y viven bajo tierra. Así, el lupino arbóreo, una planta de la costa californiana, sirve de alimento a las orugas de polilla, que se alimentan de las raíces. Las orugas son parasitadas a su vez por nematodos, y si estos están presentes en el suelo, limitarán la población de orugas, y resultará afectado un número menor de raíces.

Eventos de extinción

En casos extremos, una cascada trófica puede llevar a una especie a la extinción, como en el caso de las vacas marinas de Steller, mamíferos que vivieron en el estrecho de Bering, declarados extinguidos en 1768. Recientemente se ha argumentado que esta extinción fue causada por una cascada trófica calamitosa, desencadenada por la caza de la nutria marina hasta su práctica extinción para el comercio de pieles. La sobreexplotación de las nutrias permitió a la población de los erizos, su presa habitual, superar un determinado nivel crítico. El incremento de población de los erizos fue devastador para los bosques de kelp, la fuente de alimento de las vacas marinas. Estas no eran objeto de caza, pero no tardaron en extinguirse. Comprender cómo tales intervenciones, así como la introducción de especies no nativas, pueden dañar las cascadas tróficas es hoy vital para definir medidas de conservación. ■



Lo habitual es esperar que los herbívoros estén bien alimentados, y los carnívoros, hambrientos.
Lawrence Slobodkin



Primeros humanos y megafauna

En los últimos 60 000 años, que incluyen el fin de la última glaciación, se extinguieron unos 51 géneros de grandes mamíferos en América del Norte. La mayoría de ellos eran herbívoros, como los perezosos terrestres, mastodontes y grandes armadillos, pero otros muchos eran carnívoros, como los leones y guepardos americanos, félidos dientes de sable y osos de hocico corto.

Muchas de las extinciones se produjeron entre hace 11 500 y 10 000 años, poco después de la llegada de los cazadores de la cultura de Clovis. Una de las teorías más convincentes sobre lo sucedido es la hipótesis de depredación de segundo orden, según la cual los humanos desencadenaron una cascada trófica. Mataron a los grandes carnívoros, aquellos con los que competían por las presas. Como resultado, las poblaciones de estas aumentaron de manera desproporcionada, con la consiguiente presión sobre la vegetación. Esta no pudo ya sostener a los herbívoros, y muchos murieron de hambre.



Las pinturas rupestres de Altamira (España) muestran la importancia del bisonte para los primeros humanos. La población salvaje se extinguió en 1927, pero sobrevive en cautividad.

LAS ISLAS SON SISTEMAS ECOLOGICOS

BIOGEOGRAFÍA DE ISLAS



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Robert H. MacArthur (1930–1972), **Edward O. Wilson** (n. 1929)

ANTES
1948 El lepidopterólogo canadiense Eugene Munroe propone una correlación entre tamaño de la isla y diversidad de mariposas en el Caribe.

DESPUÉS
1971–1978 James H. Brown, biólogo estadounidense, estudia los mamíferos y las aves en «islas» de bosque en la Gran Cuenca de California y Utah.

2006 Los biólogos canadienses Attila Kalmar y David Currie estudian poblaciones de aves en 346 islas oceánicas, y descubren que la variedad de especies depende del clima además del área y del aislamiento.



Si no preservamos el resto de la vida como un deber sagrado, nos ponemos en peligro destruyendo el hogar donde evolucionamos.
Edward O. Wilson



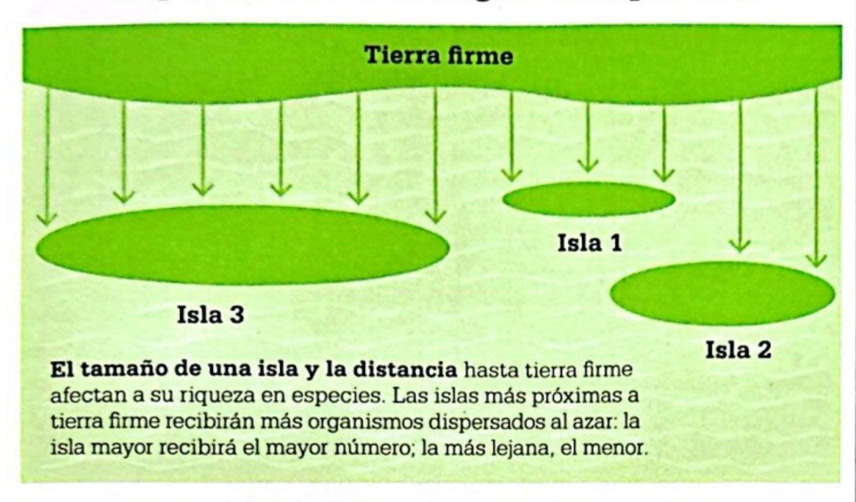
Las islas rodeadas de manglares de los Cayos de Florida –hoy protegidas por su rica vida marina y terrestre– centraron los estudios para probar la teoría de la biogeografía de islas.

La biogeografía insular, o de islas, estudia los factores que afectan a la riqueza de especies de comunidades naturales aisladas. Naturalistas como Charles Darwin y Alfred Russel Wallace escribieron sobre la flora y fauna de islas en el siglo XIX. Sus estudios fueron realizados en islas oceánicas, pero los mismos métodos se pueden aplicar al estudio de cualquier hábitat rodeado por un entorno desfavorable que limita la dispersión de sus individuos. Ejemplos de ello son los oasis en el desierto, los sistemas de cuevas y grutas, los parques en entornos urbanos, los estanques de agua dulce en paisajes secos o los fragmentos de bosque de montaña entre valles sin bosque.

A mediados del siglo XX, los ecólogos llevaron a cabo estudios más intensivos de la distribución de las especies en distintas islas, y de cómo y por qué variaba. En EE UU, los biólogos Edward Wilson y Robert MacArthur construyeron el primer modelo matemático de los factores en

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Experimentos de campo 54–55 ▪ El ecosistema 134–137

Dispersión al azar de organismos por islas



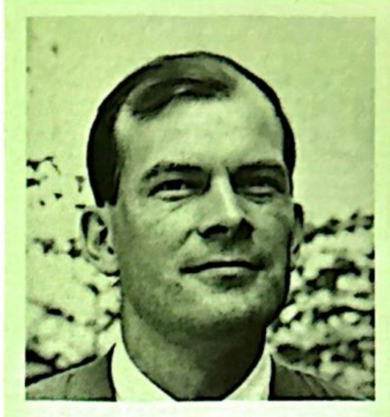
El tamaño de una isla y la distancia hasta tierra firme afectan a su riqueza en especies. Las islas más próximas a tierra firme recibirán más organismos dispersados al azar: la isla mayor recibirá el mayor número; la más lejana, el menor.

juego en los ecosistemas insulares, y en 1967 propusieron una nueva teoría de la biogeografía de islas. La teoría proponía que cada isla reflejaba un equilibrio entre la tasa de nuevas especies que llegan y la tasa a la que se extinguen las especies existentes. Por ejemplo, una isla habitable pero relativamente vacía tendría una tasa de extinción baja, al contener menos especies que puedan extinguirse. Al llegar más especies, aumenta la competencia por unos recursos limitados. Llega un punto en que las poblaciones menores pierden en la competencia, y el índice de extinción de especies aumentará. Se da un punto de equilibrio cuando el índice de inmigración de especies y el de extinción son iguales, y puede permanecer constante hasta que se produzca un cambio en uno de los índices.

La teoría propone también que el índice de inmigración depende de la distancia de tierra firme u otra isla, y que decrece cuanto mayor es la distancia. Otro factor es el área de la isla. Cuanto mayor sea, más bajo será el índice de extinción, pues, si son expulsadas de su hábitat original, las especies nativas tienen mayores posibilidades de hallar un hábitat alternativo aunque imperfecto («subóptimo»). Las islas mayores tienden también a una mayor diversidad de hábitats o microhábitats en los que acomodar nuevos inmigrantes. La combinación de variedad y tasa de extinción menor produce una mezcla de especies más rica que la de las islas pequeñas, en el llamado efecto especie-área. Debido a la colonización y la extinción, las especies de la mezcla cambian con el tiempo, pero esta se mantiene relativamente diversa.

Control de manglares

En 1969, Wilson y su alumno Daniel Simberloff realizaron un experimento de campo para probar la teoría en seis pequeñas islas de manglar en los Cayos de Florida (EE UU). Registraron las especies que allí vivían, y luego fumigaron los manglares para eliminar a todos los artrópodos, como insectos, arañas y crustáceos. En los dos años siguientes contaron las especies que volvían para observar la »



Robert H. MacArthur

Nacido en Toronto (Canadá) en 1930, Robert MacArthur se mudó a Vermont (EE UU), y estudió matemáticas. En 1957 se doctoró en Yale con su tesis sobre los nichos ecológicos ocupados por especies de reinitas en los bosques de coníferas. MacArthur hizo hincapié en la importancia de poner a prueba las hipótesis, y esto contribuyó a transformar la ecología de campo exclusivamente de observación en una que emplea también modelos experimentales. Esta metodología se refleja en *The theory of island biogeography*, escrito con Edward O. Wilson. MacArthur recibió varios premios a lo largo de toda su carrera, y fue elegido miembro de la Academia Nacional de Ciencias estadounidense en 1969. Murió de un cáncer renal en 1972. La Sociedad Ecológica de América entrega un premio bienal con su nombre.

Obras principales

1967 *The theory of island biogeography* (con E. O. Wilson).
1971 *Geographical ecology: patterns in the distribution of species.*



recolonización. El experimento de los Cayos de Florida mostró que la distancia sí desempeñaba un papel importante: cuanto más lejos estaba la isla de tierra firme, menos invertebrados regresaban a colonizarla.

No obstante, las nuevas olas de inmigración pueden salvar de la extinción incluso a especies de islas lejanas. Esto ocurre más fácilmente con ciertas especies de aves –capaces de recorrer distancias largas– que con mamíferos pequeños, por ejemplo. También se produce el llamado efecto diana, por el que ciertas islas son destinos preferidos por el hábitat que ofrecen. A la hora de escoger entre una isla boscosa y una sin árboles, un ave que anida en los árboles optará naturalmente por ellos.

Impacto humano

Los factores clave que influyen en la mezcla de especies de una isla oceánica son el grado de aislamiento, el tiempo que lleva aislada, su tamaño, lo adecuado de su hábitat, la situación con respecto a las corrientes oceánicas y las llegadas al azar (como las de organismos llegados en matas de vegetación flotante). La mayoría de estos factores se aplican a cualquier hábitat aislado, y no solo a las islas propiamente dichas.

El impacto de los seres humanos –que empezaron a alcanzar islas aisladas del Pacífico hace al menos tres mil años– ha sido drástico en algunos casos. En los últimos siglos, los colonos llevaron consigo perros, gatos, cabras y cerdos al colonizar las islas del Pacífico y otros lugares. Involuntariamente, traían también ratas en los barcos. En muchas islas, las ratas se comieron los huevos de las aves marinas y las semillas de plantas endémicas. En las Galápagos, los perros comían los huevos de tortuga gigante, de las iguanas y de los pingüinos. Las cabras compitieron con las tortugas, y eliminaron hasta cinco especies de planta en la isla de Santiago.

La llegada de los humanos, sin embargo, no siempre ha reducido la riqueza de especies de las islas. Los estudiosos descubrieron el papel importante de la colonización asistida por barcos en el Caribe. Pese a su tamaño relativamente menor, Trinidad, por ejemplo, tiene más especies de lagartijas anolis que la mucho mayor isla de Cuba, debido a las sanciones económicas que desde la década de 1960 suponen la llegada de un número menor de barcos –con sus lagartijas– al país.

Hábitats insulares

A inicios de la década de 1970, el biólogo estadounidense James H. Brown aplicó el modelo Wilson-MacArthur a las «islas» de bosque de coníferas de 19 crestas montañosas en la Gran Cuenca de California y Utah, separadas una de otra por un vasto desierto de *Artemisia tridentata*. Brown halló que la diversidad y distribución de los mamíferos pequeños (salvo los murciélagos) en los bosques aislados no se podía explicar en términos de equilibrio entre colonización y extinción. Algunas especies se habían extinguido, pero no habían llegado especies nuevas desde hacía millones de años, por lo que Brown llamó «relictas» a estas especies. Unos años después, su análisis de las poblaciones residentes de aves en las crestas reveló que habían llegado especies nuevas de aves desde bosques similares y mayores en la Sierra Nevada, al oeste. Brown concluyó que ciertos grupos de especies –sobre todo voladoras– tienen más probabilidades de éxito al inmigrar que otras.

Los ecólogos estudiaron también la diversidad de escarabajos y moscas en nueve parques de distinto



Destruir pluvisilva para obtener beneficios es como quemar un cuadro renacentista para cocinar.
Edward O. Wilson



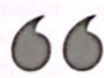


Central Park, en Manhattan (Nueva York), es una «isla» en un entorno urbano. Hay registradas 134 especies de aves, 197 de insectos, 9 de mamíferos, 5 de reptiles, 59 de hongos y 441 de plantas.

tamaño en Cincinnati (Ohio). El área era el mejor criterio para predecir la riqueza de especies, pero, cuando cotejaron sus hallazgos con los datos de tamaño de poblaciones, los ecólogos calcularon que un área de parque mayor tiende sobre todo a reducir el índice de extinción, más que a ofrecer hábitats a especies nuevas.

Prácticas de conservación

Poco después del desarrollo de la teoría de la biogeografía de islas, los ecólogos empezaron a aplicarla a la conservación. Las reservas naturales y los parques nacionales se consideraron «islas» en paisajes alterados por la actividad humana. Al crear áreas protegidas, se debatía el tamaño óptimo: ¿era mejor una reserva grande o varias pequeñas? Como muestra la teoría de islas, la biodiversidad depende de una serie de factores, y diferentes especies se benefician de entornos distintos. Un mamífero mayor de un determinado tamaño no sobrevivirá en una reserva pequeña, pero muchos seres vivos menores pueden prosperar allí. En lugares bajo presión por la actividad humana, la teoría de islas ha favorecido la creación de corredores ecológicos, que conectan lugares de hábitat adecuado, ayudando a mantener los procesos ecológicos al permitir, por ejemplo, desplazarse a los animales para que sobrevivan sus poblaciones viables, sin necesidad de una gran expansión de las áreas protegidas. ■

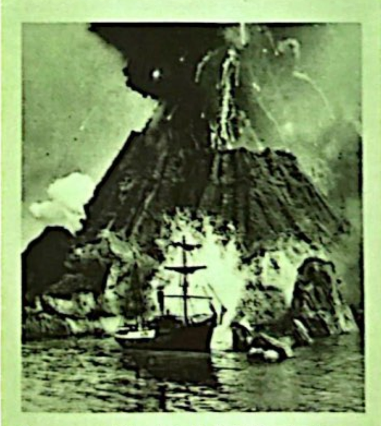


Defiendo que hasta el último fragmento de biodiversidad no tiene precio.
Edward O. Wilson



El renacer de Krakatoa

En 1883, la isla indonesia de Krakatoa fue devastada por erupciones volcánicas que exterminaron su flora y fauna y la de las cercanas Sertung y Panjang. En 1886, los musgos, las algas, las plantas con flores y los helechos habían regresado a Krakatoa, traídos por el viento o el agua. Los primeros árboles jóvenes se erguían ya en 1887; en 1889 se descubrieron varias especies de insectos y una sola lagartija. Estudios recientes muestran que el grado de inmigración en Krakatoa y las islas vecinas alcanzó el máximo en la época de formación de bosque, entre 1908 y 1921, y que el índice de extinciones se disparó al impedir el dosel arbóreo alcanzar el suelo del bosque a la luz solar, entre 1921 y 1933. Aunque casi se ha detenido la inmigración de aves terrestres y reptiles, aún siguen llegando nuevas especies de moluscos terrestres y muchos insectos de Sumatra y Java, ambas a menos de 45 km.



La erupción letal del Krakatoa produjo una nube de ceniza de 80 km de altitud que alteró los patrones climáticos globales y causó una caída de 1,2 °C durante cinco años.



ES LA CONSTANCIA DE LOS NUMEROS LO QUE IMPORTA

RESILIENCIA ECOLÓGICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Crawford Stanley Holling (n. 1930)

ANTES
1859 Charles Darwin compara la interdependencia de especies con una «orilla enmarañada».

1955 En EE UU, Robert MacArthur propone una medida de estabilidad de los ecosistemas que aumenta según se multiplican las interacciones entre especies.

1972 En contraste con MacArthur, el ecólogo australiano Robert May afirma que comunidades más diversas con relaciones más complejas pueden ser menos capaces de mantener un equilibrio de especies estable.

DESPUÉS
2003 El ecólogo australiano Brian Walker trabaja con Holling para refinar la definición de resiliencia.

La capacidad de recuperación de los ecosistemas tras una perturbación –tal como un incendio, una inundación, un huracán, una contaminación severa, la deforestación o la introducción de una nueva especie exótica– se conoce como resiliencia ecológica. Cualquiera de estos impactos puede perturbar las redes tróficas, de modo dramático en muchos casos, y la actividad humana es responsable de un número creciente de ellos.

Permanecer resiliente

Crawford Stanley Holling, ecólogo canadiense, propuso la idea de resiliencia ecológica para describir la persistencia de los sistemas naturales ante cambios perturbadores. Holling afirmó que los sistemas naturales requieren estabilidad y resiliencia, pero que, contrariamente a lo que suponían los ecólogos hasta entonces, dichas cualidades no son siempre las mismas.

Un sistema estable resiste el cambio para mantener el *statu quo*; la resiliencia implica innovación y adaptación. Holling escribió que es probable que los sistemas naturales no perturbados estén en continua transición, con poblaciones de algunas especies en aumento y otras en disminución. Pero estos cambios de población no tendrían la importancia de una alteración fundamental del sistema entero. La resiliencia de un sistema se manifiesta o bien por el tiempo que tarda en volver al equilibrio después de un trauma, o bien por su capacidad para absorber perturbaciones. Un ejemplo estudiado por Holling fue el de la pesca en los Grandes Lagos de América del Norte, de los que se extraían grandes capturas de esturión y otras especies como *Coregonus artedi* en las primeras décadas del siglo xx. La sobrepesca hizo que se redujeran drásticamente las capturas, aunque, pese a los posteriores controles, las poblaciones no se



Los ecosistemas son dinámicos, cambiantes e inherentemente inciertos, con múltiples futuros potenciales […].
Crawford Stanley Holling



Véase también: La cadena trófica 132–133 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ El flujo de energía en los ecosistemas 138–139 ▪ Cascadas tróficas 140–143



Una gruesa capa verde de algas cubre partes del lago Lonar, en Maharashtra (India). Las algas prosperan con niveles altos de nutrientes, pero al descomponerse consumen oxígeno, lo cual resulta perjudicial para los peces.

recuperaron. Holling consideró que la sobreexplotación había reducido progresivamente la resiliencia del ecosistema.

Para Holling, la resiliencia ecológica no es algo siempre positivo. Si un lago de agua dulce recibe muchos nutrientes procedente de fertilizantes agrícolas, por ejemplo, se vuelve eutrófico: las algas prosperarán, agotando el oxígeno y volviéndolo inhabitable para los peces. El lago será resiliente, pero menos biodiverso. Holling señalaba tres factores críticos que determinan la resiliencia: el máximo que puede cambiar un sistema hasta atravesar el umbral que hace imposible la recuperación total; la facilidad o dificultad de que se produzca un gran cambio en el sistema; y cómo de próximo al umbral está un sistema en la actualidad.

Estados cambiantes

En la concepción de Holling, la resiliencia al nivel del ecosistema se beneficia de poblaciones no demasiado rígidas; es decir, los componentes del ecosistema pueden cambiar. Un ejemplo es la desaparición de la mayor parte de los castaños americanos de los bosques del este de América del Norte, compensada en gran medida por la expansión de robles y carias. Esto contaba como resiliencia para Holling, pues, aunque la mezcla exacta de especies arbóreas había cambiado, el bosque caducifolio permanecía.

Hoy se comprende que los ecosistemas pueden tener más de un estado estable. En Australia, por ejemplo, los bosques donde predomina la mulga pueden darse en medios herbáceos donde se cría ganado ovino, o bien en otros de matorral, totalmente inadecuados para ello. ■

Orugas *Choristoneura*

Las orugas de *Choristoneura* han devastado los bosques de abeto balsámico del este de América del Norte en seis ocasiones desde el siglo XVIII. Crawford Stanley Holling describió un proceso con dos estados muy diferentes: uno, con árboles jóvenes de crecimiento rápido y pocas orugas; otro, con árboles maduros y un gran número de orugas.

Entre plagas de oruga, los abetos jóvenes crecen junto a píceas y abedules, y con el tiempo acaban predominando. La combinación de dicho predominio y una secuencia de años muy secos estimula un gran aumento de la población del insecto, que destruye los abetos maduros, dando a las píceas y a los abedules la oportunidad de regenerarse. Al mantener a raya al abeto, las orugas mantienen también las píceas y los abedules, que de otra manera perderían en la competencia. El sistema, por tanto, es inestable, pero a la vez resiliente.



Larvas de *Choristoneura* en Quebec (Canadá). Las orugas devoran agujas de abeto y pícea hasta que pupan. Las polillas emergen un mes después, listas para aparearse.



LAS POBLACIONES SON COMUNIDADES SUJETAS A FUERZAS IMPREDECIBLES

LA TEORÍA NEUTRAL DE LA BIODIVERSIDAD

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Hal Caswell (n. 1949),
Stephen P. Hubbell (n. 1942)

ANTES
1920 Frederic Clements describe cómo se asocian especies de plantas en comunidades.

1926 Henry Gleason propone que las comunidades ecológicas se organizan de forma más azarosa.

1967 Richard Root introduce el concepto de gremio ecológico: un grupo de especies que explotan los recursos de modo similar.

DESPUÉS
2018 Un estudio dirigido por el ecólogo neerlandés Marten Scheffer propone que, aunque las especies que emplean los mismos recursos pueden ser competitivamente equivalentes, pueden tener respuestas distintas ante factores de estrés como la sequía o la enfermedad.

La aparición de nuevas especies y la extinción de otras da forma a la biodiversidad global, y la ecología de comunidades mantiene tradicionalmente que las interacciones entre especies desempeñan un papel vital en determinar este proceso. Si dos especies compiten por los mismos recursos, o bien la más fuerte lleva a la otra a la extinción, o bien ambas se ven impelidas a un nicho de especialización más estrecho.

En 1976, no obstante, el ecólogo estadounidense Hal Caswell propuso una teoría «neutral» de la biodiversidad: las especies ecológicamente similares son competitivamente iguales, y las especies se vuelven raras o comunes debido a procesos azarosos.



Caswell hizo un intento valiente de crear una teoría neutral de la organización comunitaria.
Stephen P. Hubbell



El modelo «nulo»

A inicios de la década de 2000, el ecólogo estadounidense Stephen P. Hubbell desarrolló un modelo matemático llamado hipótesis nula, publicado en *The unified theory of biodiversity and geography* (2001), en apoyo de la teoría de Caswell. Hubbell puso el modelo a prueba estudiando comunidades reales, y las teorías neutrales de la biodiversidad han dominado la ecología de comunidades en los últimos años. No obstante, un estudio australiano de los arrecifes de coral, publicado en 2014 y centrado en especies antes dominantes casi perdidas a causa de la sobrepesca, no apoyaba esa teoría. Según Hubbell, las especies son intercambiables, y, por tanto, otras habrían tomado su lugar. Que no ocurriera en este caso apunta a un defecto de la teoría neutral. Por ello, la cuestión de qué mantiene la diversidad permanece abierta. ■

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ Biogeografía de islas 144–149 ▪ Comunidad clímax 172–173 ▪ Teoría de la comunidad abierta 174–175



SOLO UNA COMUNIDAD DE ESTUDIOSOS PUEDE LLEGAR A REVELAR EL TODO COMPLEJO

GRAN ECOLOGÍA

EN CONTEXTO

ORGANIZACIÓN CLAVE
National Science Foundation (creada en 1950)

ANTES
1926 El geoquímico y mineralogista ruso Vladímir Vernadski formula la teoría de la biosfera, que contiene todo lo que vive en la Tierra.

1935 El ecólogo pionero británico Arthur Tansley define «ecosistema» como lo que abarca todas las interacciones entre un grupo de seres vivos y su medio.

DESPUÉS
1992 Consenso internacional acerca de la importancia de proteger la biosfera en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro.

1997 Un total de 192 países firman el Protocolo de Kioto para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una comprensión cabal de los ecosistemas requiere un estudio a largo plazo. En 1980, la agencia gubernamental estadounidense National Science Foundation estableció seis áreas de la red Long Term Ecological Research (LTER), para estudiar fenómenos ecológicos a gran escala y a largo plazo. Hoy hay 28 áreas, y cinco de ellas funcionan desde 1980. Los ecólogos están reuniendo conjuntos de datos que permitirán compartir conocimientos en profundidad.

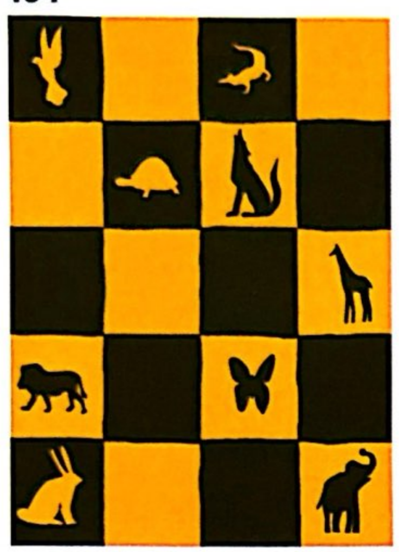
Un ecosistema de bosque

Una de las seis primeras áreas es el bosque de Andrews, en Oregón, buen ejemplo de bosque templado, con inviernos suaves y húmedos y veranos frescos y secos. Con un 40 % de bosque antiguo de coníferas, sus ecosistemas de bosque, río y prado contienen una biodiversidad alta, con miles de especies de insectos, 83 de aves, 19 de coníferas y nueve de peces. Los proyectos tratan de observar cómo el uso de la tierra (como la silvicultura) y los fenómenos naturales (incendios, inundaciones, clima) afectan a la hidrología, la biodiversidad y la dinámica del carbono (cómo este y los nutrientes circulan por el ecosistema). Hay muchas otras áreas de estudio a largo plazo para reunir datos sobre ecosistemas. Con acceso libre a la información, los estudios pueden diseminarse globalmente con facilidad. ■



La descomposición de troncos es objeto de un estudio, iniciado en 1985, que se extenderá por 200 años en seis puntos del bosque de Andrews (Oregón).

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ La biosfera 204–205 ▪ Iniciativa por una biosfera sostenible 322–323 ▪ Servicios ecosistémicos 328–329



LA MEJOR ESTRATEGIA DEPENDE DE LO QUE HAGAN LOS DEMÁS

ESTADO EVOLUTIVAMENTE ESTABLE

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
John Maynard Smith
(1920–2004)

ANTES
1944 El matemático John von Neumann y el economista Oskar Morgenstern usan una teoría de juegos de estrategia con el fin de crear una teoría matemática de la organización económica y social.

1964 W. D. Hamilton, biólogo británico, aplica la teoría de juegos a la evolución del comportamiento social en animales.

1965 Hamilton aplica la teoría de juegos a las consecuencias ecológicas de la selección natural.

1976 Richard Dawkins populariza la idea de estrategia evolutivamente estable.

DESPUÉS
1982 John Maynard Smith aplica la teoría a la evolución, la biología sexual y los ciclos vitales.

Los animales entran en **conflicto** por el **alimento**, el **territorio** y la **elección de pareja**.

↓

Han evolucionado para **reaccionar** a la conducta de otros animales de **modos preprogramados**.

↓

La mejor estrategia depende de lo que hagan los demás.

El campo de la ecología del comportamiento tiene como fin intentar explicar cómo el comportamiento de los animales –lo que comen, cómo se relacionan socialmente, etc.– ha evolucionado para adaptarse al medio. La fuerza impulsora es la selección natural, pues el medio favorece a individuos con determinados genes –«mejores» para ciertas situaciones, y no para otras–, que luego pasan a la descendencia. Si los genes influyen en el comportamiento, también lo hace la selección natural.

Comportamiento adaptativo

En 1972, el biólogo evolutivo británico John Maynard Smith presentó una teoría llamada estrategia evolutivamente estable (EEE), que ayudaba a explicar cómo aparecen estrategias de comportamiento por selección natural. El comportamiento de otras especies afecta a los animales, igual que lo hacen factores como el alimento y la temperatura. Según Smith, una EEE se adapta al comportamiento de otros animales y no es superada por otras estrategias, dando así a los animales las mayores probabilidades de transmitir sus genes. Solo la selección natural puede perturbar este equilibrio –de ahí que una EEE sea

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ El gen egoísta 38–39 ▪ Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Nichos ecológicos 50–51 ▪ Cascadas tróficas 140–143 ▪ Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157



El comportamiento en los conflictos por el espacio y el territorio puede surgir como una EEE. Los murciélagos de la fruta (o zorros voladores) se disputan el mejor lugar en los árboles, y los machos alfa relegan a ramas más bajas a los más débiles.

estable–, y estos patrones de comportamiento están preprogramados genéticamente.

La EEE procede de la teoría de juegos, un modo matemático de deducir la mejor estrategia para un juego. Muchos ejemplos de comportamiento animal resultan ser EEE, como la territorialidad y las jerarquías. Las reglas preprogramadas de «en el propio territorio, lucha y defiende», o de «en territorio ajeno, cede y retírate», por ejemplo, que sirven a los animales para conservar el territorio, se combinan para hacer del comportamiento territorial una EEE.

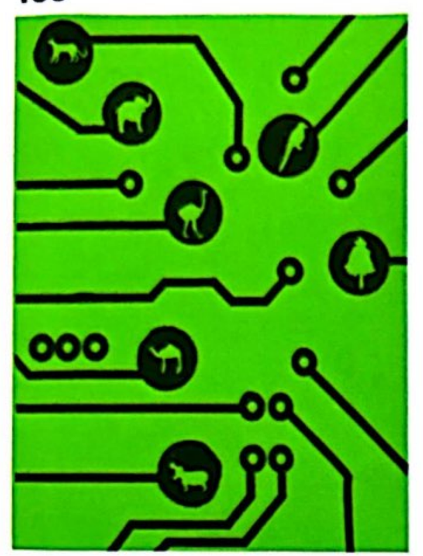
Estrategias de equilibrio

La ventaja que obtiene un individuo –o el precio que se arriesga a pagar– por un determinado comportamiento se puede cuantificar para que los biólogos puedan calcular con modelos matemáticos qué estrategias tienen mayores posibilidades de ser evolutivamente estables (véase el recuadro). Si el modelo no se corresponde con el comportamiento de los animales en el mundo real, eso apunta a que la estabilidad no ha evolucionado.

En ecosistemas reales en lugar de hipotéticos, no es una sola estrategia la que es estable, sino el equilibrio entre dos o más dentro del conjunto del sistema. El equilibrio general es, por tanto, más bien un estado evolutivamente estable que una estrategia. Tal equilibrio se da cuando todos los individuos tienen igual aptitud, y transmiten sus genes en la misma medida. El estado permanece estable, incluso cuando hay cambios menores en el medio. ■

El juego del halcón y la paloma

La forma más simple de ilustrar la estrategia evolutivamente estable (EEE), de John Maynard Smith, es la respuesta hipotética a la agresión en el juego del halcón y la paloma. Los individuos pueden comportarse como los halcones y luchar hasta quedar gravemente heridos, o como las palomas, adoptando una pose para luego retirarse. Los halcones ganan a las palomas, pero sufren daños graves contra otro halcón. Las palomas suelen escapar ilesas, pero pierden tiempo en la pose. ¿Cuál es la mejor estrategia para transmitir los genes? Según el modelo matemático de Smith y sus colaboradores, la EEE resulta ser más como un halcón que como una paloma. El modelo predijo una relación de siete halcones por cada cinco palomas, que equivale a un individuo que se comporta como halcón siete doceavas partes del tiempo, y como paloma cinco doceavas partes.



LAS ESPECIES MANTIENEN EL FUNCIONAMIENTO Y LA ESTABILIDAD DE LOS ECOSISTEMAS

BIODIVERSIDAD Y FUNCIONAMIENTO DE ECOSISTEMAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Michel Loreau (n. 1954)

ANTES
1949 Se construye el primer fitotrón (invernadero de investigación) en el California Institute of Technology para estudiar cómo manipular un ecosistema artificial.

1991 Se crea el Ecotron, o serie de ecosistemas experimentales en unidades controladas por ordenador, en el Imperial College de Londres.

DESPUÉS
2014 Ecólogos destacados de EE UU afirman que la pérdida de diversidad en los ecosistemas les afecta tanto o más que los incendios, la sequía y otros factores de cambio ambiental.

2015 Un trabajo publicado en *Nature* aporta pruebas de que la biodiversidad aumenta la resiliencia de los ecosistemas ante una gama extensa de eventos climáticos.



Fitotrón construido en 1968 en Carolina del Norte (EE UU). Contiene sesenta cámaras de cultivo, cuatro invernaderos y una instalación de ambiente controlado para estudiar enfermedades vegetales e insectos.

En una época en que la actividad humana está erosionando rápidamente la mezcla compleja de especies en distintos hábitats, los ecólogos se han centrado en cómo afecta la pérdida de biodiversidad al funcionamiento de los ecosistemas. Si las especies son reemplazadas o se extinguen, ¿puede un ecosistema permanecer intacto, o daña esto su funcionamiento?

Tales preguntas se plantearon en la Conferencia sobre Biodiversidad y Funcionamiento de Ecosistemas celebrada en París en 2000. Más de sesenta destacados ecólogos internacionales, entre ellos Michel Loreau, director del Centro de Teoría y Modelización de la Biodiversidad, en Moulis (Francia), explicaron estudios diversos. Algunos examinaban más de cerca las especies, otros analizaban qué hace que funcionen

Véase también: Mutualismos 56–59 ▪ Especies clave 60–65 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Los organismos y su medio 166 ▪ Especies invasoras 270–273



Perder biodiversidad reducirá probablemente la resistencia de los ecosistemas ante el cambio climático.
Michel Loreau



los ecosistemas. Loreau defiende la necesidad de una nueva teoría ecológica unificada para combatir los desafíos ambientales extremos, lo cual requiere integrar la ecología de comunidades (el estudio de cómo interactúan las especies en los ecosistemas) con la ecología de ecosistemas (el estudio de los procesos físicos, químicos y biológicos que conectan a los organismos con su medio).

Ciclos complejos

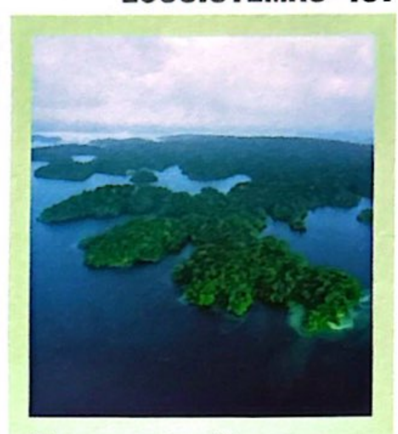
Los científicos de ambas disciplinas creen que la biodiversidad, sobre todo la diversidad genética y de especies, es un eje impulsor del funcionamiento de los ecosistemas. En lo esencial, estos funcionan a base de energía y reciclaje de nutrientes: las plantas y animales crecen, mueren y se descomponen, devolviendo nutrientes al suelo y reiniciando el ciclo. Estos procesos dependen de las especies de cada ecosistema, que a su vez dependen unas de otras al interactuar, como depredadores y presas, por ejemplo. Muchos ecólogos afirman que es necesaria una gran variedad de especies complementarias para mantener un ecosistema funcionando y resiliente frente a los cambios; otros creen que unas pocas especies clave pueden ser más importantes para evitar el colapso. Al estudiar tales temas, los ecólogos han tendido a combinar el trabajo de campo tradicional con modelos matemáticos sofisticados. Más recientemente, los estudios han comenzado a incorporar la manipulación de ecosistemas de forma más controlada, en parcelas de tierra, por ejemplo, o en sistemas cerrados en invernaderos gigantes, los fitotrones. Los experimentos sirven para determinar los factores –como número, tipo o predominio de especies– que afectan a los ecosistemas a la larga. Los hallazgos indican que los efectos de la biodiversidad sobre el funcionamiento son complejos. Los ecosistemas más diversos tienden a ser los más productivos, pero su éxito depende también del clima y la fertilidad del suelo.

Queda por aprender sobre cómo afectan la diversidad vegetal y microbiana a los procesos del suelo, y sobre los efectos de las especies mutualistas, como las plantas con flor y los insectos polinizadores. Es mucho lo logrado, pero hay aún preguntas por responder, y la teoría unificada que busca Loreau está por construir. ■



Uno de los rasgos distintivos y fascinantes de los sistemas ecológicos es su extraordinaria complejidad.
Michel Loreau





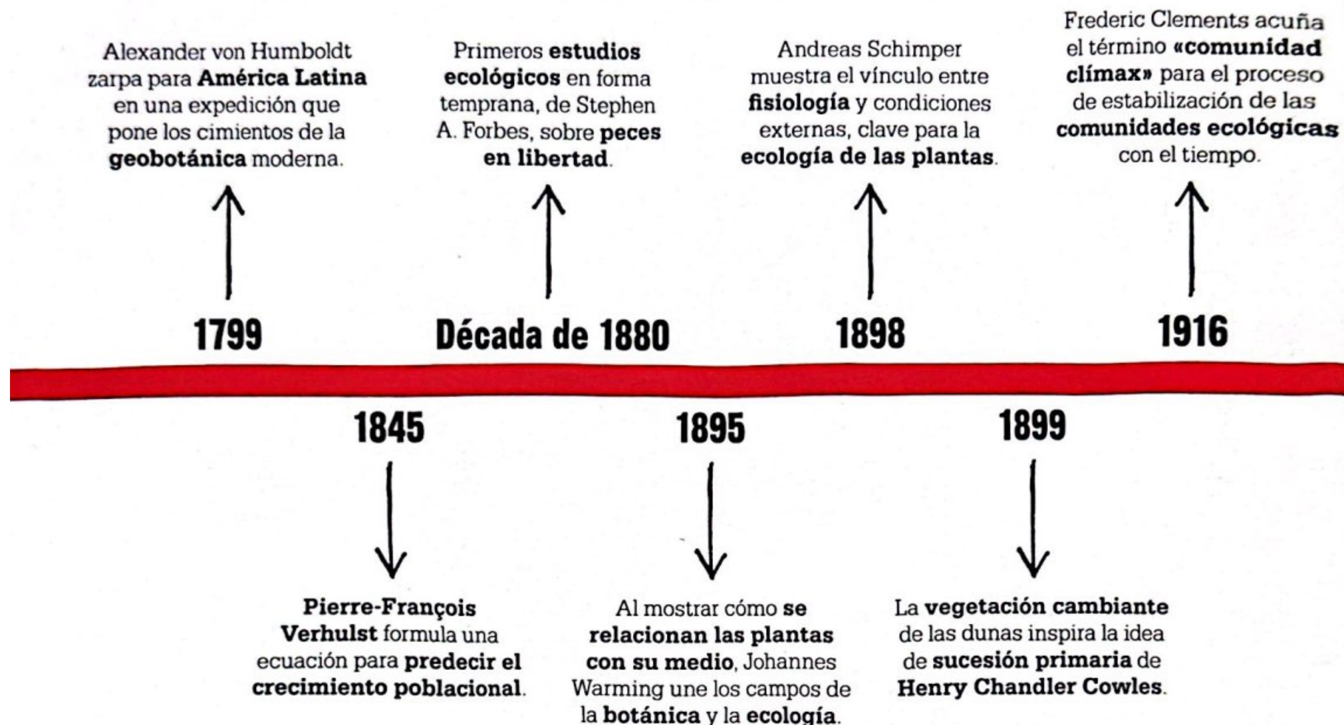
Fragmentación de hábitat

La isla de Barro Colorado, en el canal de Panamá, se formó en 1914, cuando la selva tropical fue inundada por la represa de Gatún, quedando un fragmento aislado de bosque rodeado de agua. Desde 1946, la zona ha sido estudiada por los biólogos de la Smithsonian Institution y otros a fin de determinar los efectos de esta fragmentación del hábitat: se ha reducido la diversidad de especies en la isla, y los superdepredadores están entre las especies más vulnerables. En EE UU, los estudios sobre fragmentación de hábitat y sus efectos sobre la diversidad en los Cayos de Florida desembocaron en la obra seminal *Theory of island biogeography* (1967), de Robert MacArthur y E. O. Wilson.

De medios tales se han aprendido lecciones clave sobre la conservación de especies en fragmentos aislados de hábitat –en algunos casos en plena ciudad– protegidos como reservas. Barro Colorado y otros lugares semejantes han ofrecido una ocasión crucial para el estudio de cómo la diversidad de especies afecta al funcionamiento de un ecosistema a todos los niveles.

ORGANIS
EN UN EN
CAMBIAN

MOS
TORNO
TE



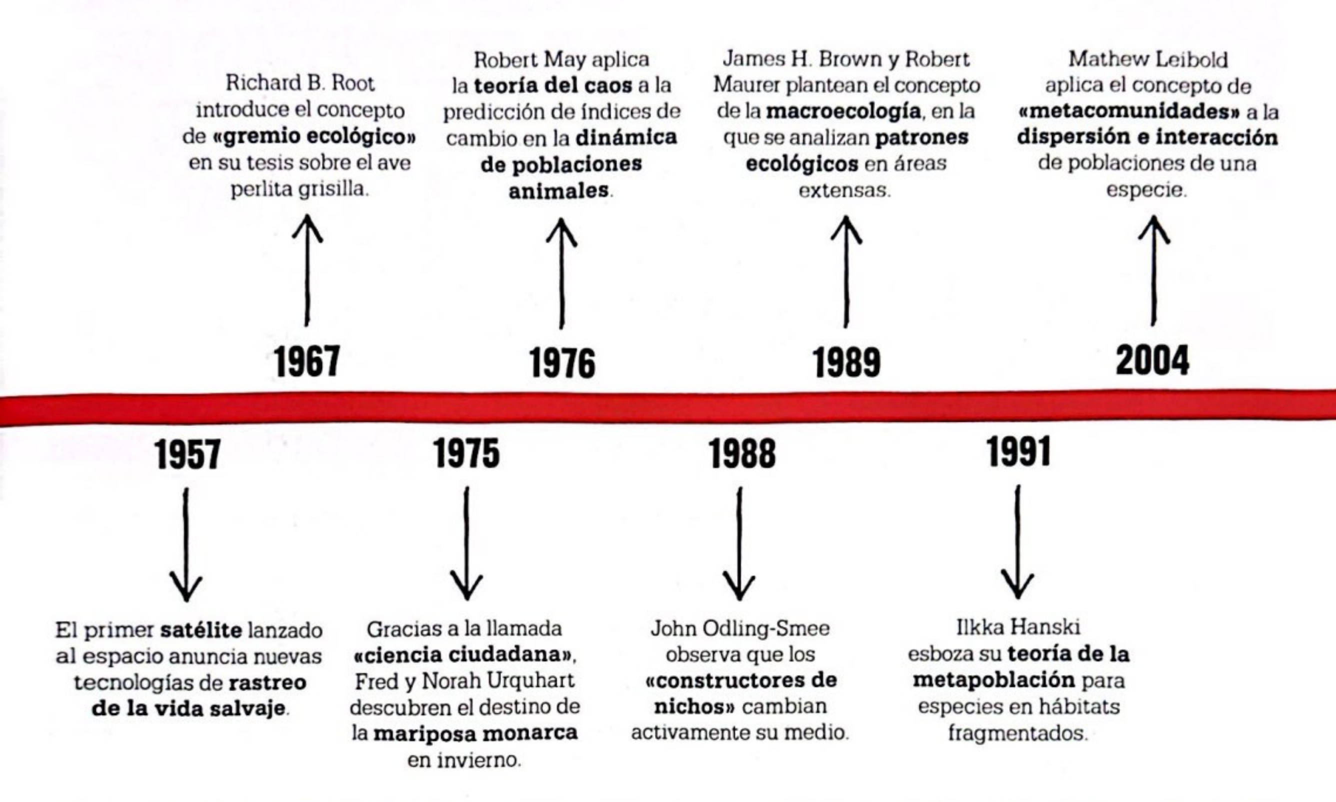
La distribución de los seres vivos en el espacio y el tiempo es de interés fundamental para la ecología. A principios del siglo XIX, el explorador prusiano Alexander von Humboldt, uno de los padres fundadores de la ecología, realizó estudios detallados de geobotánica en América Latina. Philip Sclater describió la distribución global de especies de aves, como hizo Alfred Russel Wallace para otros vertebrados, proponiendo seis regiones zoogeográficas aún vigentes en gran medida hoy.

Comunidades

El trabajo de campo en sus inicios se ocupó de la distribución y abundancia de los organismos, pero, más avanzado el siglo XIX, los científicos comprendieron que los datos de los estudios podían arrojar luz también sobre las interacciones entre especies. En cierto sentido, este fue el verdadero nacimiento del campo de la ecología. Entre los pioneros se cuentan el naturalista estadounidense Stephen A. Forbes, que estudió poblaciones de peces en libertad en la década de 1880, y el botánico danés Johannes Warming, que observó la interacción entre las plantas y su medio e introdujo la idea de comunidades de plantas.

Andreas Schimper, botánico alemán y autor de la clasificación mundial de zonas de vegetación en 1898, planteó el vínculo entre clima y tipo de vegetación predominante. A inicios del siglo XX, los ecólogos prestaron mayor atención a la interrelación de todos los organismos dentro de un ecosistema, expresada en el concepto de biosfera del científico ruso Vladímir Vernadski.

Al estudiar la vegetación de las dunas de arena de la costa del lago Míchigan en la década de 1890, Henry Chandler Cowles, botánico estadounidense, comprendió que había una sucesión de especies de plantas: las pioneras son reemplazadas por otras, y estas son suplantadas a su vez. Su compatriota Frederic Clements llamó «comunidad clímax» a la fase final de la sucesión. En 1916, Clements propuso que los patrones de la vegetación global se podían concebir como formaciones o grandes comunidades de plantas –y de los organismos que dependen de ellas– que reflejan el clima de sus respectivas regiones. Así, en las relativamente húmedas y templadas predomina el bosque caducifolio, mientras que en las templadas pero más secas tiende a predominar la pradera. Por su cohesión, Clements,



entendía estas comunidades clímax como organismos únicos y complejos.

Pronto, el botánico Henry Gleason puso en tela de juicio la idea de Clements. Gleason estaba de acuerdo con cartografiar comunidades de plantas, pero argumentaba que la ausencia de un propósito común en las especies vegetales invalidaba la idea de comunidades integradas. Su postura fue respaldada en la década de 1950 por los estudios de campo de Robert Whittaker y por los análisis numéricos de John Curtis.

En 1967, el ecólogo estadounidense Richard Root propuso la idea de «gremio», un grupo de organismos –estrechamente emparentados o no– que explotan los mismos recursos. Los ecólogos James MacMahon y Charles Hawkins refinaron luego la definición, aplicando el término a especies que «explotan el mismo tipo de recursos del medio», independientemente de cómo lo hagan.

Nuevas ideas

Muchas ideas nuevas enriquecieron la ecología a finales del siglo xx y principios del siglo xxi. El finlandés Ilkka Hanski introdujo el concepto de metapoblación, y concibió la población de una especie integrada por componentes dinámicos que difieren. Una parte de la población puede extinguirse mientras otra prospera, y esta última puede regenerar la población desaparecida.

En el proceso, según el ecólogo británico John Odling-Smee, las especies constructoras de nichos crean para sí un entorno más favorable, como se ve en incontables ejemplos, desde las antiguas cianobacterias productoras de oxígeno que alteraron la composición de la atmósfera en tiempos prehistóricos hasta la creación de humedales por los castores.

Métodos modernos

Observar y registrar el cambio medioambiental ha sido tradicionalmente tarea de académicos y ecólogos profesionales, pero millones de aficionados ecologistas aportan hoy una cantidad enorme de datos sobre cualquier aspecto, desde fechas de floración a número de mariposas, y desde el estado de los arrecifes de coral hasta las poblaciones de aves en edad de criar. Con la capacidad informática para procesar rápidamente una cantidad enorme de datos, y una ecología de la Tierra más cambiante que nunca, la llamada «ciencia ciudadana» parece destinada a convertirse en un recurso imprescindible de la ecología. ■



EL ESTUDIO FILOSOFICO DE LA NATURALEZA CONECTA EL PRESENTE AL PASADO

LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES EN EL TIEMPO Y EL ESPACIO

Hay **especies distribuidas** por todo el **mundo**.

Las **especies** se mueven con el **tiempo** y el **cambio** de la **Tierra** y sus hábitats.

Los **científicos** estudian **dónde** y **cómo** viven las **especies** hoy, y también dónde estaban **antes** y qué **cambió**.

El estudio filosófico de la naturaleza conecta el presente al pasado.

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Alexander von Humboldt (1769–1859)

ANTES
1750 Carlos Linneo explica que el clima dicta la distribución de las plantas.

DESPUÉS
1831–1836 Varias observaciones de Charles Darwin durante el viaje del *Beagle* confirman que muchos animales de ciertas zonas no viven en hábitats similares de otros lugares.

1874 El zoólogo británico Philip Sclater ofrece una descripción zoogeográfica (distribución geográfica de los animales) de las aves del mundo.

1876 Alfred Russel Wallace publica su obra en dos volúmenes *The geographical distribution of animals*, texto definitivo sobre biogeografía durante los ochenta años siguientes.

La distribución de las comunidades biológicas y las especies varía en función de numerosos factores, como la latitud, el clima, la altitud, el hábitat, el aislamiento y los rasgos de la especie. El estudio de dicha distribución es la biogeografía, que se ocupa también de cómo y por qué los patrones de distribución cambian con el tiempo. Los primeros zoólogos y botánicos, como Carlos Linneo, eran muy conscientes de las variaciones geográficas en la distribución de las especies, pero el primero en realizar estudios detallados de este aspecto de la zoología fue el polímata prusiano Alexander von Humboldt, quien viajó a la América española con el botánico francés Aime Bonpland en 1799. Su expedición de cinco años puso los cimientos de la geobotánica. Humboldt insistía en la observación *in situ*, y empleó instrumentos sofisticados en registros meticulosos de especies tanto vegetales como animales, anotando todos los factores que pudieran influir en los datos. Este

Véase también: Una visión moderna de la diversidad 90–91 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Biogeografía de islas 144–149 ▪ Gran ecología 153 ▪ Clima y vegetación 168–169



La unidad de la naturaleza supone la interrelación de todas las ciencias físicas.
Alexander von Humboldt



enfoque holístico alcanza su mejor expresión en su mapa muy detallado y su sección transversal del volcán Chimborazo, en Ecuador.

La contribución de Wallace

Muchos naturalistas del siglo XIX contribuyeron a los conocimientos biogeográficos, y uno de los más destacados fue el británico Alfred Russel Wallace. Tras leer la obra de Philip Sclater sobre la distribución global de especies de aves, Wallace se propuso hacer lo mismo para otros animales. Examinó todos los factores que se sabían relevantes entonces, como los cambios en los puentes terrestres y los efectos de las glaciaciones. Elaboró mapas para mostrar cómo la vegetación influía en la distribución de los animales, y resumió la distribución de todas las familias conocidas de vertebrados.

Wallace propuso seis regiones zoogeográficas, hoy mayormente vigentes: Neártica (América del Norte), Neotropical (América del Sur), Paleártica (Europa, el norte de África y la mayor parte de Asia), Afrotropical (África subsahariana), Indomalaya (sur y sureste de Asia) y Australasia (Australia, Nueva Guinea y Nueva Zelanda). La divisoria entre estas dos últimas regiones, que atraviesa Indonesia, se conoce aún hoy como «línea de Wallace».

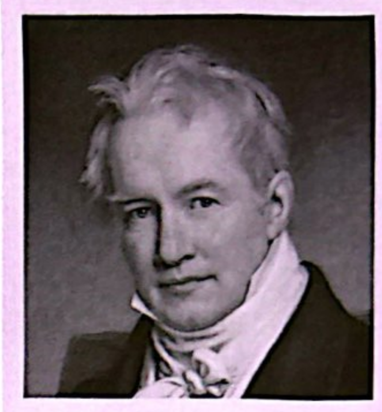
Tectónica de placas

Wallace hizo también algunos hallazgos relevantes para el registro fósil. Así, dedujo que los primeros roedores evolucionaron en el hemisferio norte, llegando posteriormente a América del Sur por Eurasia. En 1915, el geólogo alemán Alfred Wegener propuso la idea radical de que los continentes de América del Sur y África estuvieron unidos en el pasado, lo cual permitió la difusión de los tapires y de otras especies.

Wegener entendió que la distribución de las especies era en parte un registro de la historia geológica. Las especies colonizan nuevas áreas a medida que las condiciones van cambiando, y con el tiempo se han visto separadas por barreras como océanos o cordilleras. Hoy, cuando se están acelerando los cambios del clima y del medio por causas humanas –creando nuevas barreras–, esta idea ha adquirido una importancia vital. ■



Los tapires evolucionaron en América del Norte hace unos cincuenta millones de años. Pasaron a América Central, a América del Sur y el sureste de Asia, pero desaparecieron de América del Norte.



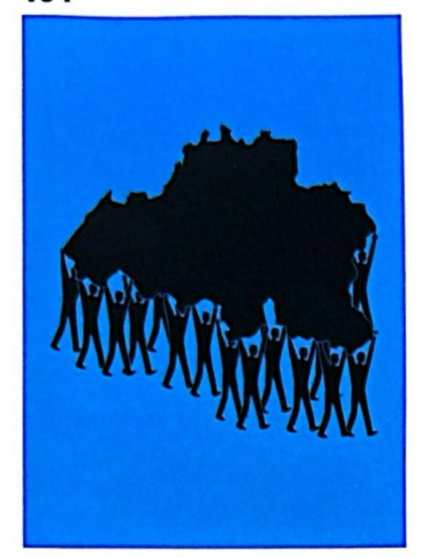
Alexander von Humboldt

Conocido como fundador de la biogeografía, Humboldt hizo también contribuciones clave a la geología, la meteorología y la zoología. Nacido en Berlín en 1769, empezó a coleccionar plantas, conchas e insectos a edad temprana. Visitó México, Cuba, Venezuela, Colombia y Ecuador en su expedición a la América hispana (1799–1804), y su equipo batió el récord mundial de altitud al escalar el Chimborazo (5878 m).

Humboldt especuló que los volcanes se deben a fisuras subterráneas profundas, estudió el descenso de la temperatura en función de la altitud, y descubrió que la fuerza del campo magnético de la Tierra se reduce a mayor distancia de los polos. La obra de 23 volúmenes que detalla la expedición se convirtió en la referencia de la literatura científica, lo cual cimentó su fama.

Obras principales

1807 *Ensayo sobre la geografía de las plantas.*
1805–1829 *Viaje a las regiones equinocciales del Nuevo Continente.*



EL INCREMENTO VIRTUAL DE LA POBLACION ESTA LIMITADO POR LA FERTILIDAD DEL PAIS

LA ECUACIÓN VERHULST

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Thomas Malthus (1766–1834), **Pierre-François Verhulst** (1804–1849)

ANTES
1798 Thomas Malthus explica que las poblaciones aumentan en progresión geométrica, y la producción de alimentos, en progresión aritmética, lo cual conduce potencialmente a la escasez.

1835 El estadístico belga Adolphe Quetelet propone que el aumento de población se ralentiza a medida que aumenta la densidad.

DESPUÉS
1911 Anderson McKendrick, médico del ejército, aplica la ecuación de Verhulst a poblaciones de bacterias.

1920 Raymond Pearl, biólogo estadounidense, propone la ecuación de Verhulst como ley de crecimiento poblacional.

Tras leer el *Ensayo sobre el principio de la población*, de Thomas Malthus, al matemático belga Pierre-François Verhulst le fascinó el crecimiento de la población humana. En 1845 publicó un modelo propio de dinámica poblacional, luego conocido como ecuación Verhulst.

Aunque influido por las ideas de Malthus, Verhulst percibía un error en sus predicciones. Malthus había afirmado que la población humana aumenta en progresión geométrica, alcanzando el doble en intervalos regulares. A Verhulst esto le parecía demasiado simplista, al no tener en cuenta la dificultad de una población mayor para hallar alimento. Lo que proponía Verhulst es que la población se acerca progresivamente a un estado estable, en el que la tasa de reproducción está en proporción tanto con la población existente como con la cantidad de alimento disponible. En el modelo de Verhulst, tras alcanzar un punto de inflexión, el crecimiento poblacional se ralentiza gradualmente hasta alcanzar la capacidad de carga de un área dada (el número de individuos que es capaz de mantener). En un gráfico, el modelo de Verhulst describe una curva en forma de «S», la llamada curva logística.



La hipótesis de la progresión geométrica se aplica solo a circunstancias muy especiales.
Pierre-François Verhulst



Demostraciones prácticas

El modelo de Verhulst fue ignorado durante varias décadas, en parte porque él mismo no estaba convencido del todo. En 1911, sin embargo, el médico del ejército y epidemiólogo escocés Anderson McKendrick usó la ecuación logística para predecir el crecimiento de poblaciones de bacterias, y en 1920 la ecuación fue adoptada y promovida en EE UU por Raymond Pearl.

Pearl realizó experimentos con moscas de la fruta y gallinas. Suministró una cantidad constante de alimento a las moscas de la fruta en un frasco. En un principio, la tasa de

Véase también: La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163 ▪ Metapoblaciones 186–187 ▪ Metacomunidades 190–193 ▪ Sobrepoblación 250–251



Actualmente, los biólogos no corren riesgo alguno de ostracismo si se aventuran a estudiar problemas humanos.
Raymond Pearl



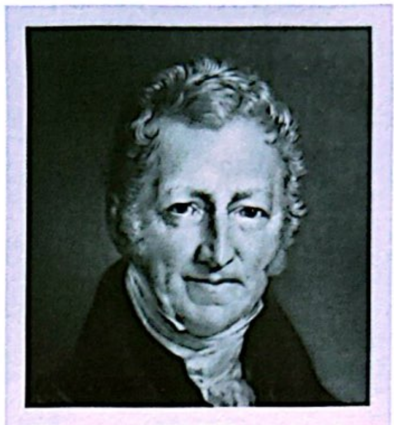
fertilidad aumentó. A medida que se incrementaba la densidad, sin embargo, aumentaba la competencia por los recursos, y se alcanzó un cuello de botella tras el cual la tasa de fertilidad decayó. Su número siguió creciendo, pero lentamente, y en general el nivel poblacional se estabilizó. Análogamente, Pearl comprobó que al aumentar el número de gallinas en un gallinero, a las gallinas les resultaba más difícil encontrar comida. A medida que se reducía el espacio entre ellas, ponían menos huevos, y, al decaer la tasa de fertilidad, la tasa de crecimiento de la población se estabilizaba gradualmente.

Estrategias variables

Las dos variables clave de la ecuación Verhulst son la capacidad máxima de una especie para reproducirse *(r)* y la capacidad de carga del área *(K)*. Los seres vivos son o bien *r*-estrategas, o bien *K*-estrategas. Los *r*-estrategas, como las bacterias, los ratones y las aves pequeñas, se reproducen rápidamente, maduran pronto y tienen una vida relativamente breve. Los *K*-estrategas, como los seres humanos, los elefantes y las secuoyas gigantes, tienen una tasa reproductiva menor, tardan más en madurar y tienden a vivir más tiempo. Los ecólogos estudian a los *r*-estrategas, a menudo en medios inestables, para estimar los riesgos de su nivel reproductivo necesariamente alto, y a los *K*-estrategas en entornos más predecibles, para garantizar la supervivencia de especies a largo plazo. ■



A las moscas de la fruta les atraen las frutas y verduras maduras. Son muy habituales en los laboratorios, por ser fáciles de criar y reproducir.

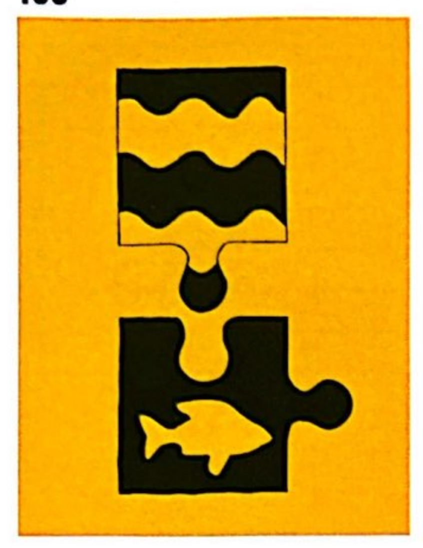


Thomas Malthus

Malthus, séptimo hijo de una familia acomodada, nació en Surrey (Reino Unido) en 1766. Tras estudiar matemáticas e idiomas en la Universidad de Cambridge, ocupó el puesto de coadjutor de una iglesia rural. En 1798 publicó el ensayo donde afirmaba que el aumento de la población humana supera al más lento de la producción de alimentos, conduciendo necesariamente al hambre. Malthus publicó otras seis ediciones del ensayo, y viajó varias veces por Europa para reunir datos sobre población. En 1805 fue nombrado catedrático de historia y economía política de la East India Company College. Malthus participó en el debate sobre política económica, y criticó el sistema de las *Poor Laws* (leyes de ayuda a los pobres) por causar inflación y no mejorar la vida de los pobres. Murió en 1834.

Obras principales

1798 *Ensayo sobre el principio de la población.*
1820 *Principios de economía política.*
1827 *Definitions in political economy.*



EL PRIMER REQUISITO ES UN CONOCIMIENTO CABAL DEL ORDEN NATURAL

LOS ORGANISMOS Y SU MEDIO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Stephen A. Forbes
(1844–1930)

ANTES
1799–1804 Alexander von Humboldt inaugura el campo de la biogeografía en sus viajes por América Latina.

1866 El naturalista alemán Ernst Haeckel acuña el término «ecología» para el estudio de los organismos en relación con su medio.

1876 Tras muchos y largos viajes, el naturalista británico Alfred Russel Wallace publica *The geographical distribution of animals.*

DESPUÉS
Década de 1890 Frederic Clements propone la noción de comunidades ecológicas.

1895 En *Plantesamfund (Ecología de las plantas)*, Johannes Warming describe el impacto del medio sobre la distribución vegetal.

El concepto de «naturalista» –un estudioso de los seres vivos en el mundo natural– se remonta a la antigua Grecia. Aristóteles realizó abundantes observaciones de la vida salvaje, y puso los cimientos para los naturalistas posteriores. Hasta el siglo XIX, sin embargo, no se comprendió realmente el alcance de tales estudios.

El nuevo estudio de la ecología

Al poder viajar los naturalistas a lugares lejanos, se conoció mejor la distribución global de las especies, y arraigó el concepto de la ecología como ciencia.

Uno de los primeros científicos que empleó métodos ecológicos fue el biólogo estadounidense Stephen A. Forbes. Estudiando los peces de un lago de Wisconsin a finales de la década de 1880, comprendió que los datos del estudio informaban de las interacciones entre distintas especies, y no solo de su abundancia. Forbes amplió el espectro de los estudios convencionales, combinando trabajo práctico de campo con análisis teórico y experimentos. Los nuevos estudios ofrecían una perspectiva del orden natural en un medio, y, al arrojar luz sobre los efectos interrelacionados de su vida vegetal y animal, ayudarían a explicar la distribución de las especies y su variación a lo largo del tiempo. ■



Las imágenes de satélite revelan cambios a gran escala a los ecólogos. Las zonas verdes de esta imagen del mar Caspio indican la presencia de algas por el enriquecimiento por nutrientes.

Véase también: Clasificación de los seres vivos 82–83 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157



LAS PLANTAS VIVEN EN UNA ESCALA TEMPORAL DISTINTA

FUNDAMENTOS DE LA ECOLOGÍA VEGETAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Johannes Eugenius Warming (1841–1924)

ANTES
1859 Las descripciones detalladas de plantas y animales en su medio natural realizadas por Charles Darwin difunden el aprecio por lo que más adelante se llamará «ecología».

DESPUÉS
1935 El botánico británico Arthur Tansley publica un artículo en *Ecology* donde define «ecosistema».

1938 Los botánicos estadounidenses John Weaver y Frederic Clements amplían los conceptos de comunidades y sucesión de plantas.

1995 El documental de televisión de David Attenborough *La vida privada de las plantas* las representa como una influencia dinámica sobre su medio.

La ecología vegetal estudia la interacción de las plantas unas con otras y con el medio. El botánico danés Johannes Eugenius Warming fue el primero en combinar las ciencias botánica y ecológica en *Plantesamfund (Ecología de las plantas)*, de 1895, donde describía cómo reaccionan las plantas al entorno y la relación de sus ciclos vitales y estructuras con el lugar donde crecen. El libro introdujo la idea de comunidades vegetales, y esbozaba cómo un grupo de especies interactúa y se desarrolla bajo las mismas condiciones locales.

Plantas y ecosistemas

Durante muchos años, la ecología de las plantas y los animales se estudió por separado, pero surgió una perspectiva más conectada a principios del siglo XX, cuando se asentaron teorías importantes sobre las comunidades y la sucesión de plantas, el proceso por el que una comunidad ecológica cambia con el paso del tiempo. En 1926, el geoquímico ruso Vladímir Vernadski usó el concepto de la biosfera, las partes de la superficie y la atmósfera terrestre donde todos los organismos vivos existen e interactúan.

Las plantas son indicadores sensibles de los cambios del medio. El estudio de su anatomía, fisiología, distribución y abundancia, así como de sus interacciones con otros organismos y sus respuestas a factores ambientales como las condiciones del suelo, la hidrología y la contaminación, aportan información valiosa sobre el ecosistema en su conjunto. ■



Que la tierra es una comunidad es el concepto básico de la ecología.
Aldo Leopold
Ecólogo estadounidense



Véase también: Clima y vegetación 168–169 ▪ Sucesión ecológica 170–171 ▪ La biosfera 204–205 ▪ Hábitats en peligro 236–239 ▪ Deforestación 254–259



CAUSAS DE LAS DIFERENCIAS ENTRE PLANTAS

CLIMA Y VEGETACIÓN

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Andreas Schimper (1856–1901)

ANTES
1737 En *Flora lapponica*, Linneo incluye detalles de la distribución geográfica de las plantas de Laponia.

1807 Humboldt publica su seminal libro *Ensayo sobre la geografía de las plantas.*

DESPUÉS
1916 En *Plant succession: an analysis of the development of vegetation*, Frederic Clements describe las comunidades de especies como indicadores del clima en que han madurado.

1968 «The role of climate in the distribution of vegetation», de los geógrafos estadounidenses John Mather y Gary Yoshioka, explica cómo la temperatura y las precipitaciones no bastan para definir la distribución de plantas.

El hecho de que crecen plantas diferentes en distintos climas es sobradamente conocido desde que existe la agricultura, y muchas culturas comercian con cultivos desde hace miles de años. El vínculo claro entre la vegetación predominante de una región y el clima, sin embargo, no fue explicado de modo categórico hasta que el botánico alemán Andreas Schimper publicó sus ideas sobre geografía vegetal en 1898.

Botánicos anteriores como Carlos Linneo y Alexander von Humboldt habían tratado la distribución de plantas en el siglo XVIII y principios del siglo XIX. El muy viajado Humboldt comprendía que el clima era uno de los factores clave que determinan en qué lugares crecen las plantas y en cuáles no. Schimper fue un paso más allá, al explicar que se dan tipos de vegetación similares bajo condiciones climáticas similares en distintas partes del mundo, una observación que se refleja en la clasificación global de zonas de vegetación que realizó.

Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage (Geografía vegetal sobre una base fisiológica), obra escrita en 1898 por Schimper, de 870 páginas, es uno de los monográficos ecológicos más extensos escritos por un solo autor. Síntesis de geobotánica y fisiología vegetal, puso los cimientos del estudio de la ecología de las plantas. Schimper explicó que el vínculo entre la estructura de las plantas y las condiciones externas a las que se enfrentan es la clave de lo que denominó «geografía de plantas ecológica». Dividió la vegetación de modo general en zonas tropicales, templadas, árticas, de montaña



«Plantas piedra» *(Lithops)* nativas del sur de África, de hojas gruesas y carnosas, están bien adaptadas al suelo seco y pedregoso. Hay especies emparentadas con esta en hábitats similares de Australia.

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Ecofisiología 72–73 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Fundamentos de la ecología vegetal 167 ▪ Biogeografía 200–201 ▪ Biomas 206–209



[...] no pasará mucho tiempo antes de que se conozcan bien todas las plantas y su distribución geográfica.
Andreas Schimper



y acuáticas, luego subdivididas a su vez en función del clima predominante. La vegetación tropical, por ejemplo, se subdivide en sabana, bosque espinoso, bosque, pluvisilva tropical o bosque con una estación seca pronunciada, dependiendo de si el clima es húmedo todo el año, solo de modo estacional o predominantemente árido.

Adaptaciones a condiciones extremas

Schimper realizó un estudio atento de la fisiología vegetal, es decir, de las estructuras de las plantas y de cómo estas se adaptaron a condiciones diversas de temperatura y humedad. Le interesaron en particular las plantas que crecían en condiciones climáticas extremas. En los medios salados, por ejemplo, viven plantas que toleran niveles muy altos de salinidad del suelo y del agua. Schimper comprobó que la vegetación de los cráteres sulfurosos de Java y de los manglares en las costas de Brasil, el Caribe y Ceilán era similarmente tolerante a la sal.

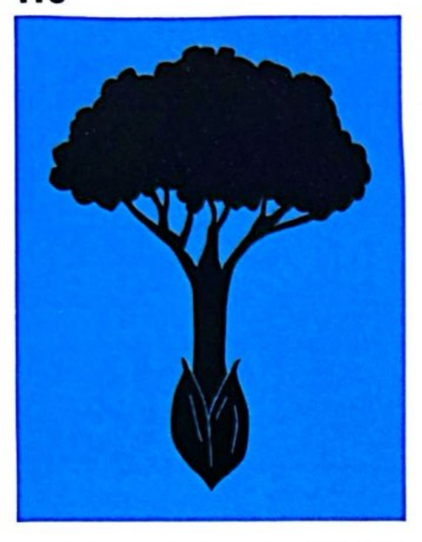
Schimper estudió también cómo las plantas resistían las duras condiciones de medios áridos, y observó que en las plantas de lugares cálidos y secos habían evolucionado «diversos mecanismos para regular el paso del agua». Para ilustrarlo, escogió un tipo de vegetación de hojas resistentes, de internodos (distancia entre las hojas a lo largo del tallo) cortos y de orientación paralela u oblicua a la luz solar directa. Este tipo se daba en varias partes áridas del mundo en las que el agua escasea. El nombre que dio Schimper a estas plantas fue «esclerófilas» –del griego *skleros* («duro») y *phyllon* («hoja»)–, que se sigue utilizando hoy.

Las epifitas, plantas que crecen en la superficie de otras plantas y obtienen el agua y los nutrientes del aire o la lluvia, también fascinaron a Schimper, que observó especies como el musgo español en el sur de EE UU y las islas del Caribe, y otras similares en América del Sur y el sur y sureste de Asia, áreas cuyo vínculo común eran las temperaturas altas y la humedad todo el año, rasgos de lo que denominó pluvisilva tropical.

Aunque las divisiones geográficas generales de Schimper siguen vigentes, hoy se comprende mejor cómo se desarrolla la vegetación en respuesta a estímulos diversos más allá de las meras diferencias climáticas. Las mediciones de evaporación potencial, agua sobrante y déficit de agua, que pueden combinarse en un índice de humedad, son determinantes más útiles de la distribución de las plantas que las cifras de temperatura y precipitaciones por sí solas. ■

Como otras epifitas, el musgo español crece sobre otras especies, pero obtiene agua y nutrientes del aire, no de su anfitrión. Prosperan en medios tropicales y subtropicales.





TENGO UNA GRAN FE EN UNA SEMILLA

SUCESIÓN ECOLÓGICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Henry Chandler Cowles (1869–1939)

ANTES
1825 Adolphe Dureau de la Malle acuña el término «sucesión» para la nueva vegetación de bosques despejados.

1863 El botánico austriaco Anton Kerner publica un estudio sobre sucesión en la cuenca del Danubio.

DESPUÉS
1916 Frederic Clements afirma que las comunidades alcanzan un clímax, o equilibrio estable, al final de la sucesión.

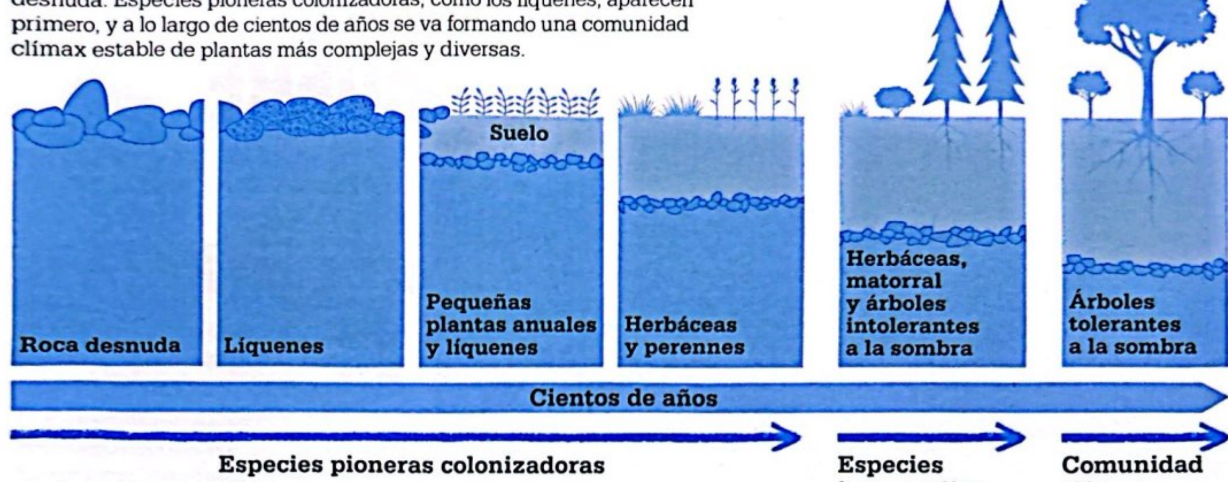
1977 Los ecólogos Joe Connell y Ralph Slatyer sostienen que la sucesión se da de formas diversas, subrayando la facilitación (preparar la llegada de especies posteriores), la tolerancia (de menos recursos) y la inhibición (resistir la competencia).



Hace 15000 años no habría habido más que arena desnuda alrededor de la orilla del lago Míchigan. La vegetación se desarrolló en el gradiente entre la arena próxima al agua y el bosque.

Las Dunas de Indiana consisten en una franja de arena móvil barrida por el viento en la orilla sur del lago Míchigan (EE UU). En 1896, el botánico estadounidense Henry Chandler Cowles vio estas dunas por primera vez, y así comenzó su carrera en el campo emergente de la ecología. Las dunas están entre las formaciones menos estables de la Tierra, y, por tanto, los cambios en su ecología se producen relativamente rápido. Al caminar entre ellas, Cowles observó que la materia en descomposición de ciertas plantas que morían creaba condiciones favorables para otras, y que al morir estas podían crecer otras distintas. A partir de sus observaciones, Cowles desarrolló la idea de sucesión ecológica, aunque naturalistas anteriores hubieran ya preparado el terreno para tal concepto. En un discurso de 1860 a los miembros de la Middlesex Agri-

Véase también: Experimentos de campo 54–55 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Comunidad clímax 172–173 ▪ Teoría de la comunidad abierta 174–175 ▪ Biomas 206–209 ▪ Romanticismo, conservación y ecología 298



cultural Society de Massachusetts, Henry David Thoreau había declarado: «Aunque no creo que brote una planta donde no ha habido semilla, tengo una gran fe en una semilla».

Crecimiento de un ecosistema

Al geógrafo francés Adolphe Dureau de la Malle se le atribuye el primer uso del término «sucesión» en un contexto ecológico, al ser testigo de la progresión de comunidades de plantas después de despejar un bosque. Cowles ofreció una articulación más formal de su teoría de la sucesión ecológica en *The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan*, publicado en 1899. En este trabajo seminal proponía la idea de sucesión primaria: el crecimiento gradual de un ecosistema originalmente casi carente de vida vegetal en origen. Las fases de la sucesión primaria incluyen plantas pioneras (a menudo líquenes y musgo), seguidas de herbáceas, arbustos y árboles.

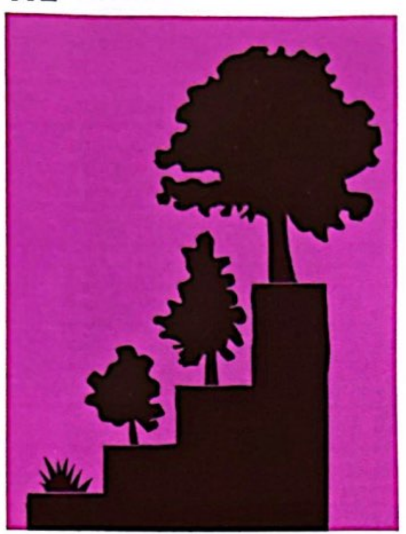
Vida tras la perturbación

La sucesión secundaria se da tras una perturbación que destruye la vida vegetal, como una inundación o un incendio. Las plantas se restablecen y desarrollan un ecosistema similar al anterior. Las fases de la sucesión secundaria son semejantes a las de la primaria, aunque el ecosistema puede empezar en puntos diferentes del proceso, según el nivel de daño causado por el desencadenante. Un ejemplo frecuente de sucesión secundaria se da tras un incendio en bosques de roble y pacana. Los nutrientes de plantas y animales quemados aportan las condiciones adecuadas para el crecimiento de plantas anuales, a las que pronto siguen las herbáceas pioneras. Tras varios años, debido al menos en parte a los cambios ambientales y del suelo traídos por las especies pioneras colonizadoras, comienzan a crecer arbustos y robles, pinos y pacanas. A medida que ganan altura y dejan más suelo en sombra, las herbáceas van siendo sustituidas por plantas capaces de sobrevivir con poca luz, y, pasados unos ciento cincuenta años, el bosque vuelve a parecerse a la comunidad anterior al incendio. ■



Encontré pruebas innegables de que: a) el bosque sucedió a la pradera; y b) la pradera había sucedido al bosque.
Henry Allan Gleason
Ecólogo estadounidense





LA COMUNIDAD SURGE, CRECE, MADURA Y MUERE

COMUNIDAD CLÍMAX

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Frederic Clements
(1874–1945)

ANTES
1872 El botánico alemán August Grisebach clasifica los patrones de la vegetación mundial según el clima.

1874 El filósofo británico Herbert Spencer concibe la población humana como un organismo gigante.

1899 En EE UU, Henry Cowles propone que la vegetación se desarrolla en fases, en la llamada sucesión.

DESPUÉS
1926 Henry Gleason, ecólogo estadounidense, afirma que la comunidad clímax es un grupo azaroso de individuos.

1939 El botánico británico Arthur Tansley propone que no hay una sola comunidad clímax, sino «policlímax» que responden a diversos factores.

En cada región, **las plantas crecen y se desarrollan** en una **serie de sucesiones**.

Por fases, se van volviendo **mayores**, más **complejas** e **interconectadas**.

Con el tiempo, la **vegetación adopta** la **forma interconectada** más compleja que permita el **clima**.

Al alcanzar una comunidad este «clímax», la vegetación ya no cambia.

El término «comunidad clímax» fue propuesto por primera vez en 1916 por el botánico estadounidense Frederic Clements, aplicado a una comunidad ecológica duradera que ha alcanzado un estado estable, como sería un bosque de árboles antiguos, naturalmente estable y no sujeto a cambios no naturales como la tala.

Comunidades regionales

En el siglo XIX, los botánicos alemanes August Grisebach y Oscar Drude, entre otros, comprendían que los diferentes tipos de vegetación del mundo reflejaban factores tales como la variación climática. Estaba claro, por ejemplo, que la vegetación típica de un clima tropical húmedo era muy diferente de la de uno templado y seco. En 1899, un trabajo del botánico estadounidense Henry Cowles marcó un hito, al describir cómo las plantas colonizaban las dunas de arena de la orilla del lago Míchigan por fases –o sucesiones– de tamaño y complejidad crecientes.

En su influyente *Plant succession* (1916), Frederic Clements desarrolló la idea de Cowles, que combinó con el pensamiento biogeográfico de los dos botánicos alemanes para crear

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163 ▪ Sucesión ecológica 170–171 ▪ Teoría de la comunidad abierta 174–175 ▪ El gremio ecológico 176–177 ▪ Biomas 206–209

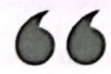


El desierto de Sonora, visto a menudo como ejemplo de comunidad clímax, recibe lluvias en invierno y en verano; sus singulares plantas, como, por ejemplo, el saguaro, son inusualmente exuberantes.

una teoría del desarrollo de las comunidades naturales.

Clements proponía comprender los patrones de la vegetación mundial en términos de «formaciones», grandes comunidades de plantas donde predomina una gama de organismos que reflejan el clima regional. En cada región, las plantas pasan por fases o sucesiones hasta que alcanzan la forma de vegetación más compleja y desarrollada posible. Al alcanzar el clímax, la comunidad se estabiliza, en lo que se llamaría más adelante «estado estable», y deja de cambiar.

Clements propuso también que las comunidades clímax están cohesionadas: aunque una comunidad ecológica se componga de multitud de plantas en distintas fases de crecimiento, mantenía que se podía considerar como un solo organismo complejo. Una comunidad crece hasta alcanzar su clímax, de modo análogo a como un individuo se desarrolla por fases vitales. Clements amplió la idea para que abarcara a todos los organismos de un «bioma», que comprende «todas las especies de plantas y animales en un hábitat particular». A partir de aquí se desarrolló la idea del ecosistema como superorganismo.



Para Clements, los climas son como genomas, y la vegetación, como un organismo cuyas características determina el genoma.

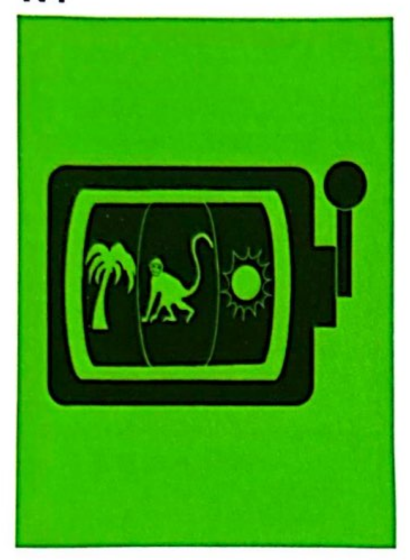
Christopher Elliott
Filósofo de la ciencia



Un proceso fluctuante

Las ideas de Clements toparon con objeciones desde el principio, pero la idea de un estado estable resultó influyente y dominó el pensamiento sobre ecosistemas hasta la década de 1960. No obstante, los científicos comprendieron que las comunidades cambian constantemente en respuesta a las condiciones y que es casi imposible observar una verdadera comunidad clímax. En la década de 1950, el premio de 10000 dólares ofrecido por el botánico estadounidense Frank Egler a quien identificara una comunidad como esa nunca fue reclamado. Pese a las dificultades, los ecólogos siguieron usando la teoría de la comunidad clímax para decidir la respuesta a las especies invasivas que amenazaban a la comunidad nativa establecida; además, las ideas de Clements han recuperado apoyo en las últimas décadas.

La sucesión continúa siendo un principio fundamental de la ecología. En general, las primeras fases de la sucesión consisten en especies muy difundidas de crecimiento rápido, sustituidas luego por especies más competitivas. En un principio, los ecólogos creían que la sucesión ecológica acababa en la llamada fase clímax, al alcanzar el ecosistema un equilibrio estable, pero actualmente se acepta que la sucesión ecológica es un proceso dinámico y en cambio constante. ■



LA ASOCIACION NO ES UN ORGANISMO, SINO UNA COINCIDENCIA

TEORÍA DE LA COMUNIDAD ABIERTA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Henry Allan Gleason
(1882–1975)

ANTES
1793 Alexander von Humboldt emplea el término asociación para toda la gama de tipos de plantas de un hábitat dado.

1899 El estadounidense Henry Cowles explica el desarrollo por fases de la vegetación, en la llamada sucesión.

1916 Frederic Clements concibe la comunidad clímax como un único organismo.

DESPUÉS
1935 Arthur Tansley acuña el término «ecosistema».

1947 Robert H. Whittaker inicia estudios de campo que refutan la idea holística de comunidades de plantas de Clements.

1959 John Curtis respalda a Henry Gleason con estudios numéricos de comunidades de plantas de la pradera.

Las plantas **crecen** según sus **necesidades individuales**.

No hay ninguna **prueba** de un **desarrollo integrado** entre plantas.

Crecen de forma azarosa, influidas solo por las condiciones del medio.

Una comunidad ecológica no es un organismo.

Cuando el botánico y ecólogo estadounidense Frederic Clements propuso la idea de las comunidades clímax en 1916, concebía la comunidad como un superorganismo en cuyo desarrollo interactúan todas las plantas y animales. Un año más tarde, el ecólogo estadounidense Henry Gleason rechazó la idea, argumentando que las especies vegetales carecen de un propósito común, y actúan movidas por sus necesidades individuales. Su hipótesis acabó conociéndose como teoría de la comunidad abierta. La disputa dio pie a un debate que aún hoy continúa en círculos ecológicos.

Gleason aceptaba cartografiar las comunidades de plantas e identificar sus interacciones, pero no apreciaba integración alguna tal como la percibía Clements, y veía los grupos de plantas como el crecimiento azaroso de individuos y especies en respuesta a las condiciones locales.

Necesidades individuales

Para Gleason, los cambios de la sucesión ecológica a medida que evoluciona la composición de una comunidad no son fases integradas como las del desarrollo de un único organismo, sino más bien una combinación de respuestas de especies individuales que tratan de satisfacer sus necesidades en un lugar dado. «Cada especie de planta», afirmaba Gleason, «tiene su propia ley». Gleason negaba también la existencia de una fase final o comunidad clímax,

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163 ▪ Sucesión ecológica 170–171 ▪ Comunidad clímax 172–173 ▪ El gremio ecológico 176–177 ▪ Biomas 206–209



Enfermedades como el cancro del castaño desmienten la idea de una comunidad clímax totalmente integrada: la pérdida del árbol predominante puede traer el colapso de todo el ecosistema.

ya que creía que las comunidades están cambiando siempre.

Opiniones cambiantes

El debate de Gleason con Clements causó un gran revuelo. Clements defendía una perspectiva de patrones naturales de la vegetación determinados por normas claras, igual que en la ciencia newtoniana el movimiento de los planetas está dictado por leyes incontrovertibles. Clements y sus seguidores contemplaban la cuestión en su dimensión más amplia o general, y tacharon a Gleason de reduccionista, de estar enfrascado en los detalles y de ser contrario a la noción de la ecología como una ciencia gobernada por leyes.

Gleason parecía negar la existencia de patrones en la naturaleza, en la que todo sería producto del azar. También fue acusado de justificar la explotación agropecuaria, pues de sus ideas se podía extraer que no hay que preocuparse demasiado por perturbar el equilibrio natural del medio ambiente, al no haber tal cosa. Las ideas de Gleason, por tanto, fueron olvidadas bajo el afán de desarrollar la ecología como ciencia; y su frustración fue tal que abandonó la ecología en la década de 1930, a medida que el holismo recibía el creciente apoyo surgido de una noción interactiva del ecosistema.

No obstante, a medida que continuaban estudiando el mundo, los ecólogos iban encontrando un inconveniente tras otro en la teoría de Clements. En la década de 1950, los estadounidenses Robert H. Whittaker y John Curtis pusieron de manifiesto la imposibilidad de identificar las comunidades con las unidades nítidas de la teoría holística. El mundo real era más sutil y complejo, y, a la hora de estudiar ecosistemas sobre el terreno, las ideas de Gleason parecían encajar mejor.

En las décadas siguientes, los ecologistas siguieron defendiendo el enfoque holístico, mientras los ecólogos aplicaban en medida creciente a su trabajo los conceptos de Gleason, hoy considerado una de las figuras más importantes de la ecología del siglo XX. ■

Henry Allan Gleason

Nacido en 1882, Henry Gleason estudió biología en la Universidad de Illinois. Fue profesor, y realizó aclamados estudios ecológicos en lo que hoy es el área protegida del bosque estatal de Sand Ridge, en Illinois. En la década de 1920, su teoría de las comunidades de plantas individualistas –en lugar de holísticas– no fue aceptada por los ecologistas, lo cual movió a Gleason a abandonar la ecología en la década siguiente. Siguió trabajando en el Jardín Botánico de Nueva York, y fue famoso su trabajo de clasificación. Junto con el botánico Arthur Cronquist, escribió una ya clásica y valiosa guía de las plantas del noreste de EE UU. Se jubiló en 1950, pero continuó escribiendo y estudiando. Murió en 1975.

Obras principales

1922 «On the relation between species and area».
1926 «The individualistic concept of the plant association».



UN GRUPO DE ESPECIES QUE EXPLOTAN SU MEDIO DE MODO SIMILAR

EL GREMIO ECOLÓGICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Richard B. Root (1936–2013)

ANTES
1793 Alexander von Humboldt aplica el término «asociación» a la mezcla de tipos de plantas en un hábitat dado.

1917 Joseph Grinnell acuña el término «nicho» para describir cómo encaja una especie en su medio.

1935 El botánico británico Arthur Tansley identifica los ecosistemas –comunidades bióticas integradas– como unidades clave de la ecología.

DESPUÉS
1989 El estadounidense James MacMahon propone que no importa cómo usen los recursos los miembros de un gremio ecológico.

2001 Los ecólogos argentinos Sandra Díaz y Marcelo Cabido proponen agrupar especies por su efecto similar sobre su entorno.

Los ecólogos tratan de comprender desde hace tiempo la manera en que interactúan las especies de una comunidad para explotar los recursos del medio. Un concepto clave de la explicación de dicha interacción es la idea de gremio, desarrollada originalmente por el biólogo y ecólogo estadounidense Richard B. Root en 1967.

Root había estudiado para su tesis doctoral la manera en que un ave, la perlita grisilla (o perlita azulgris), explota su nicho ecológico. El concepto de nicho ecológico se remonta a 1917, año en que el biólogo estadounidense Joseph Grinnell usó el término para describir cómo otra ave, el cuitlacoche californiano, encajaba en su medio de matorral, el chaparral. El nicho del cuitlacoche representa los aspectos de su hábitat a los que el ave está bien adaptada.

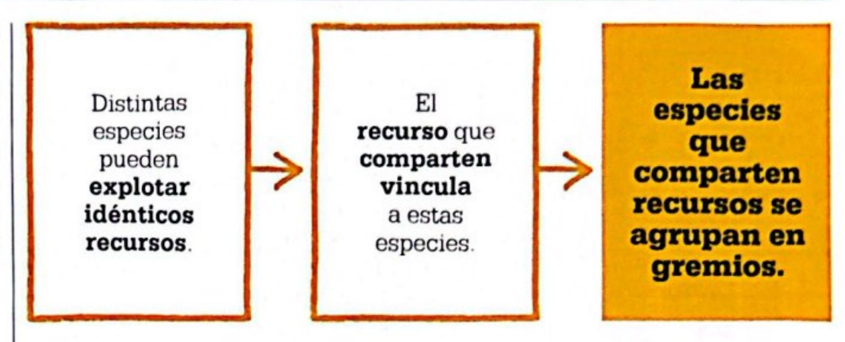
Root observó que la perlita grisilla se alimenta de insectos que



La perlita grisilla pertenece a un gremio de pequeñas aves que comen insectos de los robles; entre otros miembros del mismo están el vireo de Hutton y el herrerillo unicolor.

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Teoría del forrajeo óptimo 66–67 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Teoría de la comunidad abierta 174–175 ▪ Metacomunidades 190–193

viven entre las hojas de los robles. El análisis detenido del contenido estomacal de varias otras aves indicaba que estas comían los mismos insectos que la perlita grisilla, por lo que propuso agrupar a todas ellas en un «gremio de recolectores del follaje de roble», dado que explotaban todas el mismo recurso.



Recursos compartidos

Root definió el gremio como un grupo de especies que «explotan la misma clase de recursos del medio de modo similar». No importa si las especies de un gremio están emparentadas o no, sino solo el modo en que se sirven del medio. Ni siquiera es necesario que ocupen el mismo nicho, sino tan solo que utilicen el mismo recurso. Los gremios se identifican por el recurso alimenticio que comparten, aunque podría tratarse de cualquier otro recurso en común. Compartir el mismo recurso supone que los miembros de un gremio compiten a menudo entre sí, pero esta competencia no es necesariamente constante. Aunque compitan por el mismo alimento, por ejemplo, en otras ocasiones pueden cooperar para protegerse de los depredadores.

El concepto de gremio fue un gran avance para el pensamiento sobre los vínculos entre organismos y ecosistemas. La teoría implicaba que todo el funcionamiento de un ecosistema se podía entender identificando todos los gremios que contiene. Es una tarea potencialmente vasta, pero los ecólogos han logrado identificar muchos nuevos gremios que confirman los vínculos entre especies. Las aves de América del Norte, por ejemplo, se pueden agrupar en gremios de recolectoras, cavadoras, halconeras, perseguidoras aéreas y carroñeras.



¿Importa el que una determinada especie de insecto sea atrapada por una telaraña en lugar de por el pico de un ave?
Charles Hawkins y James MacMahon



Asociaciones más amplias

En la carrera por identificar gremios, hubo alguna confusión acerca del significado del término. En la década de 1980, los ecólogos estadounidenses Charles Hawkins y James MacMahon consideraron necesario redefinirlo, proponiendo eliminar de la definición original de Root las palabras «de modo similar». Carece de importancia si un ser vivo retira una hoja de un árbol para alimentarse o lo hace para anidar. De uno u otro modo, los usuarios de hojas pertenecen al mismo gremio, ya que explotan el mismo recurso. ■

Richard B. Root

El biólogo y ecólogo estadounidense Richard Root nació en Dearborn (Míchigan), en 1936. Se crió en una granja, explorando la naturaleza y deseando conocer «cómo funcionan los bosques». Al completar el doctorado en la Universidad de Míchigan, Root era ya un ecólogo experto. Su tesis de 1967 sobre la perlita grisilla, en la que introdujo el concepto clave de gremio, cimentó su reputación. Fue invitado a trabajar en la Universidad de Cornell, donde enseñó biología y ecología. En la misma época estudió la relación entre los artrópodos (gran grupo de invertebrados que incluye insectos y arácnidos) y las flores de la vara de oro. Root recibió muchos premios a lo largo de su carrera, entre ellos al Ecólogo Eminente, en 2003, y el premio Odum en 2004, ambos de la Ecological Society of America.

Obras principales

1967 «The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher».

LA RED CIUDADANA DEPENDE DE LOS VOLUNTARIOS

CIENCIA CIUDADANA



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Fred Urquhart (1911–2002),
Norah Urquhart (1918–2009)

ANTES
1883 Comienza el programa de registro de Migración y Distribución de Aves en EE UU.

1966 Comienza en Maryland el sondeo llamado North American Breeding Birds Survey, llevado a cabo por voluntarios.

DESPUÉS
2007 La Global Biodiversity Information Facility (GBIF) lanza un portal *online* global para reunir datos sobre plantas y animales de voluntarios y profesionales.

2010 El proyecto *online* eBird, creado en EE UU en 2002 por el Laboratorio de Ornitología de Cornell para comunicar avistamientos en tiempo real, se convierte en un proyecto global.



Los millones y millones de mariposas [...] alfombraban el suelo en miríadas llameantes en esta montaña mexicana.
Fred Urquhart



Rutas de migración norteamericanas



Las rutas de las aves migratorias en América del Norte se pueden dividir en cuatro zonas, de norte a sur: pacífica, central, del Misisipi y atlántica. La ciencia ciudadana puede desempeñar un papel clave en el registro de aves cuando paran para alimentarse o descansar, al volar al norte en primavera y al sur en otoño.

La ciencia ciudadana –estudios y observaciones realizadas por individuos, equipos o redes de voluntarios no profesionales, por lo general en colaboración con científicos profesionales– se basa, por una parte, en la idea de que la comunidad científica debe ser sensible a las inquietudes medioambientales de la sociedad, y, por otra, en el hecho de que los ciudadanos pueden aportar datos fiables para lograr un conocimiento científico mayor. La participación de ciudadanos de a pie permite a los equipos de investigación realizar proyectos que de otro modo serían demasiado caros o demasiado largos.

Primeros entusiastas

La expresión «ciencia ciudadana» data de la década de 1980, pero el concepto y la práctica de recurrir al público para observar el mundo natural tiene una historia más larga. En la década de 1870, pequeños grupos de ornitólogos en Alemania y Escocia comenzaron a reunir informes sobre la migración otoñal de las aves, empleando los aficionados escoceses los faros de la costa como puestos de observación. A principios de la década siguiente, el ornitólogo estadounidense Wells Cooke aplicó la idea de la observación colectiva a escala nacional, con un proyecto para reflejar las fechas de llegada de las aves migratorias norteamericanas y documentar sus rutas. El proyecto de Cooke duró hasta la Segunda Guerra Mundial, y reunió unos seis millones de fichas sobre más de ochocientas especies de aves contando con un máximo de unos tres mil voluntarios. En 2009, el Programa Fenológico de Aves de América del Norte empezó a digitalizar los datos, lo cual ha aportado pruebas valiosas del cambio de fechas y rutas migratorias como resultado del cambio climático global.

El estudio ciudadano más antiguo aún en marcha es el Christmas Bird Count (CBC), realizado cada año en EE UU. Por Navidad, las cacerías de aves, para comer o como trofeo, fueron un pasatiempo popular en muchas zonas rurales de EE UU en el

Véase también: Un sistema para identificar todos los seres vivos 86–87 ▪ Gran ecología 153 ▪ La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163

siglo XIX. En 1900, Frank Chapman, de la Audubon Society –así nombrada en honor del ornitólogo y pintor estadounidense John James Audubon– propuso contar las aves en lugar de dispararles. Animó a 27 ornitólogos aficionados a participar en el primer evento, y la cifra fue creciendo de año en año. En 2016–2017, 73 153 observadores de aves aportaron recuentos de 2536 lugares del continente americano, del Pacífico y del Caribe. Esto ha aportado gran cantidad de datos sobre número y distribución de aves a los ecólogos, lo cual ha permitido hacer comparaciones en el tiempo y entre hábitats.

En busca de la monarca

Quizá el caso más célebre de ciencia ciudadana fue la iniciativa para resolver el misterio de adónde iba la mariposa monarca migratoria en invierno. En 1952, la pareja formada por los zoólogos canadienses Fred y Norah Urquhart, fascinados desde hacía tiempo por la monarca, pidieron ayuda a un pequeño grupo de «científicos ciudadanos» para etiquetar las alas de las mariposas e informar de avistamientos. De la docena de ayudantes de la Insect Migration Association, como acabó por llamarse, pasaron a contar con cientos de voluntarios que colaboraron durante años, marcando a cientos de miles de monarcas con el mensaje: «Envíe a Zoología, Universidad de Toronto».

Pese a los esfuerzos de los Urquhart, no se pudieron rastrear las mariposas más allá de Texas. Al fin, el 2 de enero de 1975, dos naturalistas aficionados, Ken Brugger y Catalina Aguado, descubrieron el lugar de invernada de la monarca, en el bosque montano al norte de Ciudad de México. Sin embargo, no se encontraron monarcas etiquetadas, y no fue hasta el mes de enero siguiente que los Urquhart hallaron una, etiquetada por dos niños en edad escolar de Minnesota el agosto anterior. La »



Las observación de aves por «científicos ciudadanos» en parques y jardines puede aportar a los ecólogos datos vitales sobre muchas especies, como el jilguero europeo.



Fred y Norah Urquhart

Nacido en 1911, Fred Urquhart se crió junto a una vía férrea en las afueras de Toronto (Canadá), y le intrigaron las mariposas monarca que ponían huevos cerca de la vía. Después de licenciarse y obtener un máster en biología en la Universidad de Toronto en 1937, Urquhart comenzó a estudiar estas mariposas. Tras enseñar meteorología a pilotos durante la Segunda Guerra Mundial, regresó a la universidad como docente del departamento de zoología, y se casó con Norah Roden Patterson, otra licenciada en Toronto, quien se unió a su búsqueda del hogar invernal de la monarca. Fred Urquhart fue también conservador de insectos y director de zoología y paleontología del Museo Real de Ontario. Fred y Norah Urquhart recibieron en 1998 la máxima distinción civil de su país, esto es, la Orden de Canadá.

Obras principales

1960 *The Monarch butterfly.*
1987 *The Monarch butterfly: international traveller.*

Las mariposas monarca se apiñan para calentarse durante la migración. El etiquetado por voluntarios reveló sus rutas migratorias, y continúa en el evento anual «Monarch Watch».



La ciencia debería ser asunto de aficionados, no de técnicos burócratas condicionados por el dinero.

Erwin Chargaff

Bioquímico austrohúngaro



ciencia ciudadana había aportado la prueba incontrovertible de que las mariposas migraban desde el norte del continente a México. Hoy se sabe dónde pasan el invierno millones de monarcas, y se presta más atención a sus movimientos en primavera y otoño. Miles de personas en México, EE UU y Canadá están ayudando a obtener una imagen más precisa de las rutas seguidas por las monarcas y de cómo se enfrentan a los patrones climáticos cambiantes.

Ciudadanos en marcha

En las décadas de 1960 y 1970 se lanzaron nuevos proyectos basados en el voluntariado, entre ellos el North American Breeding Bird Survey, el proyecto British Nest Records Card y un estudio de las puestas de las tortugas marinas en Japón. En 1979, en Reino Unido, la Real Sociedad para la Protección de las Aves lanzó el proyecto Big Garden Birdwatch, en el que los voluntarios no tenían ni que salir de casa, sino limitarse a registrar lo que vieran en su jardín, patio trasero o calle. En 2018 participaron más de quinientas mil personas, que registraron unos siete millones de aves. La enorme cantidad de datos reunidos se puede comparar de año en año hasta 1979. Sin ayuda pública, esto no habría sido posible.

En 1989, en la revista *American Birds* apareció por primera vez impresa la expresión «ciencia ciudadana», aplicada a un proyecto de voluntarios patrocinado por la Audubon Society para tomar muestras de lluvia y medir su acidez. El fin del proyecto era concienciar al público de la acidificación de ríos y lagos, que mata a peces e invertebrados e, indirectamente, a sus aves depredadoras, y también presionar al gobierno de EE UU, que no tardó en aprobar la enmienda de 1990 de la Ley de Aire Limpio.

La ciencia ciudadana ha mostrado también su valor para la conservación marina. En las Bahamas, un informe de 2012 sobre la reducción del número de los grandes caracoles marinos rosados, o botutos, desembocó en la campaña «Conchservation» para animar a la población local a etiquetarlos. Otro proyecto, iniciado en EE UU por la Universidad de Georgia en 2010, emplea una aplicación, Marine Debris Tracker (rastreador de desechos marinos), para registrar avistamientos de desechos en los mares y océanos. Comprender los patrones de acumulación de desechos en los mares del

mundo sirve a los científicos para rastrear su transporte por las corrientes y saber dónde concentrar los esfuerzos de limpieza para su máxima eficacia.

La llegada de las nuevas tecnologías ha conducido a la proliferación de los proyectos de ciencia ciudadana. Los sistemas de registro *online* permiten anotar avistamientos de todo lo imaginable, desde ciervos volantes (insectos coleópteros) hasta flores silvestres o aves migratorias. En Reino Unido, por ejemplo, la página web Greenspace Information for Greater London (GiGL), creado por la National Biodiversity Network, permite anotar registros *online* o por teléfono, contribuyendo a una base de datos que usan los científicos que trabajan para conservar especies y hábitats.

Limitaciones y potencial

Algunos proyectos de estudio ecológico quedan más allá del alcance de los aficionados sin formación, ya que requieren un alto grado de competencia o una tecnología demasiado cara o compleja. Los no familiarizados con los métodos científicos pueden introducir sesgos en los registros, como la omisión de una especie que no han podido identificar.

No obstante, la mayoría de las tareas simples de la ciencia ciudadana no requieren formación alguna, y otras más complejas se pueden acometer recibiendo una instrucción básica. Uno de los atractivos de la ciencia ciudadana es que permite adquirir nuevas habilidades. La presión creciente sobre los medios naturales y recursos de la Tierra crea una necesidad creciente de datos que registren la presencia, la ausencia y los cambios de las especies, así como sus hábitats y ecosistemas. Proyectos como Zooniverse, la mayor plataforma de ciencia ciudadana del mundo, contribuyen a satisfacer esta necesidad acumulando los datos que aportan unos 1,7 millones de voluntarios en todo el mundo. En los años venideros, tales proyectos serán un recurso inestimable para las organizaciones conservacionistas, instituciones científicas, ONG y gobiernos. ■



Jóvenes voluntarias en Siyeh Pass, Montana (EE UU), registran observaciones de cabras de las Rocosas para el proyecto de ciencia ciudadana del Parque Nacional de los Glaciares.

El **estudio científico** suele requerir **reunir grandes cantidades** de **datos**.

Cuantos más **datos hay**, más **representativos** de la **realidad** son los **resultados**.

Las **redes de voluntarios** pueden **reunir** una cantidad vasta de **datos** de **áreas** muy **extensas**.

La red ciudadana depende de los voluntarios.

Completar el cuadro

La ciencia ciudadana es hoy el mayor suministrador de datos sobre la observación de seres vivos. Es más fácil que nunca registrar los datos, y los algoritmos de inteligencia artificial pueden procesar en minutos lo que antes llevaba semanas de trabajo. Si una persona registra avistamientos de aves que acuden a un comedero y envía un informe por teléfono al sito web eBird de la Universidad de Cornell, la información se compara con datos previos de factores tales como cifras de población y rutas migratorias. Más de 390000 personas han aportado millones de avistamientos de aves a eBird desde casi cinco millones de lugares del mundo. Los datos se introducen en la Global Biodiversity Information Facility (GBIF, coordinada en Dinamarca), que reúne información sobre plantas, animales, hongos y bacterias, y que hoy contiene más de mil millones de observaciones, número que crece a diario.



LA DINAMICA DE POBLACIONES SE VUELVE CAOTICA AL DISPARARSE LA TASA REPRODUCTIVA

CAMBIO DE POBLACIÓN CAÓTICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Robert May (n. 1936)

ANTES
1798 Thomas Malthus afirma que las poblaciones humanas crecerán cada vez más rápido, causando inevitablemente miseria.

1845 Según el demógrafo belga Pierre-François Verhulst, los límites al crecimiento de la población aumentarán con esta.

DESPUÉS
1987 Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, investigadores de Nueva York, describen la «criticidad autoorganizada»: elementos en un sistema que interactúan espontáneamente para producir cambios.

2014 George Sugihari, ecólogo japonés, utiliza un enfoque de teoría del caos, el modelo dinámico empírico, para mejorar la estimación del número de salmones en el río Fraser, en Canadá.

La teoría del caos –en la que el tiempo y el carácter no lineal del comportamiento limitan las predicciones– arraigó en la década de 1960. El meteorólogo estadounidense Edward Lorenz observó el efecto en los patrones del clima, y lo describió en 1961. Desde entonces, la teoría se ha aplicado a muchas ciencias, como la dinámica de poblaciones.

Poblaciones caóticas

En la década de 1970, el científico australiano Robert May se interesó por la dinámica de poblaciones animales, y trabajó en un modelo para predecir aumentos o descensos con el tiempo. Esto le llevó a la ecuación logística del matemático belga Pierre-François Verhulst, que da una curva en forma de «S» en un gráfico, mostrando primero un crecimiento lento y luego acelerado, que después tiende al equilibrio.

Robert May experimentó con la fórmula de Verhulst para crear un mapa logístico de las tendencias de población en un gráfico. Este creaba patrones predecibles en las tasas de crecimiento más bajas; sin embargo, May vio que los resultados eran erráticos con tasas iguales o superiores a 3,9. En lugar de patrones repetidos, el mapa reflejaba trayectorias totalmente azarosas. El trabajo de May mostró cómo una ecuación simple y constante puede producir un comportamiento caótico. Los demógrafos utilizan en la actualidad el mapa logístico para rastrear y predecir el aumento de la población. ■



Caos: cuando el presente determina el futuro, pero el presente aproximado no determina aproximadamente el futuro.
Edward Lorenz



Véase también: Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Efectos no consuntivos de los depredadores sobre sus presas 76–77 ▪ Metapoblaciones 186–187



VISUALIZAR LA TOTALIDAD REQUIERE UNA PERSPECTIVA LEJANA

MACROECOLOGÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
James H. Brown (n. 1942)

ANTES
1920 El ecólogo sueco Olof Arrhenius crea una fórmula matemática para la relación entre área y diversidad de especies.

1964 El entomólogo británico C.B. Williams documenta patrones de abundancia, distribución y diversidad de especies en *Patterns in the balance of nature.*

DESPUÉS
2002 Los ecólogos británicos Tim Blackburn y Kevin Gaston defienden que la macroecología debería tratarse como disciplina distinta de la biogeografía.

2018 Un equipo de científicos usa métodos macroecológicos prácticos para mostrar que las especies de aves isleñas tienen cerebros relativamente mayores que sus parientes de tierra firme.

Los científicos que buscan formas más rápidas de analizar y combatir las muchas amenazas a las poblaciones de plantas y animales recurren cada vez más a la macroecología. El término, acuñado por los ecólogos estadounidenses James Brown y Brian Maurer en 1989, se aplica a estudios que analizan las relaciones entre los organismos y su medio en áreas extensas para explicar su abundancia, diversidad, distribución y cambio.

Brown había ensayado esta metodología en la década de 1970 al estudiar los efectos potenciales del calentamiento global sobre las especies de los hábitats frescos y húmedos de 19 crestas aisladas de la Gran Cuenca en California y Utah. Como harían falta años de trabajo de campo para tener datos suficientes, usó los estudios realizados y sacó nuevas conclusiones. Primero, predijo la reducción del área del hábitat de las crestas, con un aumento estimado de la temperatura. Con los datos conocidos en el área mínima necesaria para mantener una población de cada especie de pequeños mamíferos, Brown dedujo el riesgo de extinción en cada cresta con las mayores temperaturas, y propuso medidas de conservación.

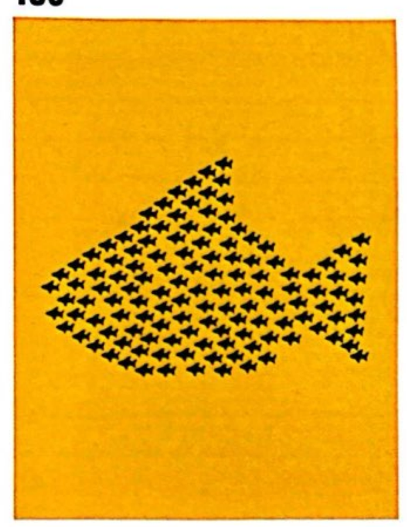
Refuerzo del trabajo de campo

La macroecología suele suplementar el trabajo de campo, y puede conducir a descubrimientos sorprendentes. En Madagascar, al desarrollar modelos para especies de camaleones, y para predecirlos fuera de su área de distribución conocida con datos de satélite, se descubrieron varias especies hermanas. ■



Los macroecólogos pueden determinar las mayores amenazas sobre una especie, como esta rata canguro cola de bandera, comparando estudios de comunidades en los desiertos del mundo.

Véase también: Experimentos de campo 54–55 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ Biogeografía de islas 144–149 ▪ Gran ecología 153 ▪ Hábitats en peligro 236–239



UNA POBLACION DE POBLACIONES

METAPOBLACIONES

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Ilkka Hanski (1953–2016)

ANTES
1931 En EE UU, el genetista Sewall Wright explora la influencia de factores genéticos en poblaciones de especies.

1933 En Australia, el ecólogo Alexander Nicholson y el físico Victor Bailey desarrollan su modelo de dinámica de poblaciones para la relación parásito-huésped.

1954 En *The distribution and abundance of animals*, los ecólogos australianos Herbert Andrewartha y Charles Birch niegan que solo la densidad controle las poblaciones de especies.

DESPUÉS
2007 James Petranka, ecólogo estadounidense, aplica la teoría de metapoblaciones a las fases de la metamorfosis en anfibios.

Una **especie se extingue** en una parte de un hábitat.

Una **especie coloniza** una parte de hábitat **vacía**.

La **extinción** y la **colonización** son **procesos dinámicos**.



Una extinción local no anuncia la extinción de una especie.

Una metapoblación es una combinación de poblaciones locales separadas de una única especie. El término fue acuñado por el ecólogo estadounidense Richard Levins en 1969, para describir cómo crecen y decrecen las poblaciones de plagas de insectos en los campos de cultivo. Desde entonces, su uso se ha ampliado a cualquier especie separada por hábitats en poblaciones locales, tanto en tierra como en los mares y océanos.

Una especie determinada de ave, por ejemplo, puede estar repartida en poblaciones separadas entre un bosque del llano, bosques de montaña y varios otros lugares. La especie es como una familia cuyos miembros se han mudado a diferentes ciudades, pero continúan emparentados. El efecto combinado de muchas poblaciones puede favorecer la supervivencia a largo plazo de la especie.

Separadas pero juntas

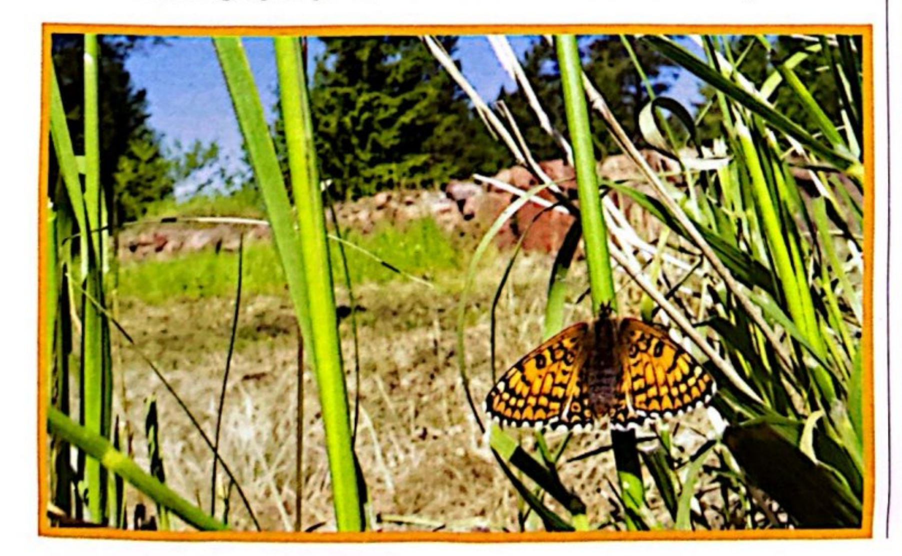
Un aspecto crucial de la teoría de metapoblaciones es el grado de interacción entre poblaciones locales separadas. Si dicho grado es alto, no se considera como una metapoblación, sino que todos los grupos loca-

Véase también: Ecología animal 106–113 ▪ Control de la nidada 114–115 ▪ Biogeografía de islas 144–149 ▪ Metacomunidades 190–193

les conforman una gran población. En una metapoblación, el contacto entre los diversos grupos locales es limitado, pues se encuentran parcialmente aislados en sus respectivos hábitats. Tiene que haber, sin embargo, al menos alguna interacción: puede tratarse de un solo valiente o expulsado de un grupo que llega al hábitat de otro y se aparea. Un aislamiento demasiado prolongado separa poblaciones hasta el punto de que ya no son capaces de cruzarse, y, con el tiempo, se convierten en especies o subespecies diferentes.

En la década de 1990, el ecólogo Ilkka Hanski expuso una noción central de la teoría de metapoblaciones, la de que las poblaciones locales son inestables. La metapoblación en su conjunto puede ser estable, pero las poblaciones locales crecen y decrecen en sus respectivos hábitats en respuesta a influencias del interior y del exterior. Algunos miembros pueden emigrar y unirse a una población reducida en riesgo de extinción, renovando y recuperándola, en lo que se conoce como efecto rescate. Otros grupos pueden desaparecer, dejando espacios vacíos que puede colonizar otra población. Hanski mantenía que hay un equilibrio persistente entre «muertes» (extinciones locales) y «nacimientos» (el establecimiento de poblaciones nuevas en áreas desocupadas). Comparó este equilibrio con el contagio de una enfermedad, donde los vulnerables y los infectados por parásitos patógenos toman el lugar de las partes vacías y ocupadas.

Los ecólogos dan una importancia creciente al concepto de metapoblaciones para comprender cómo sobreviven las especies, sobre todo enfrentadas a la influencia humana sobre sus hábitats. La teoría sirve para analizar cómo crecen y menguan las poblaciones, y permite predecir cuánta fragmentación del hábitat puede soportar una especie antes de verse empujada a la extinción. ■



Las mariposas doncellas punteadas, en sus hábitats fragmentados del archipiélago finlandés de Åland (en sueco, o Ahvenanmaa en finés), ofrecían el caso ideal para los estudios de Ilkka Hanski sobre metapoblaciones.



Ilkka Hanski

Ilkka Hanski, considerado generalmente el padre de la teoría de metapoblaciones, nació en Lempäälä (Finlandia), en 1953. De niño coleccionaba mariposas, y al encontrar una especie rara decidió dedicar su vida a la ecología. Estudió en las universidades de Helsinki y Oxford. Por aquella época, los ecólogos prestaban poca atención a la distribución de poblaciones locales de especies; no obstante, Hanski entendió que era crucial, y, como consecuencia, pasó gran parte de su carrera ensayando la teoría de metapoblaciones, cartografiando y registrando más de cuatro mil fragmentos de hábitat de doncellas punteadas en las islas Åland. Esta labor le permitió crear el Centro de Investigación en Metapoblaciones en Helsinki, organismo líder a escala mundial en estudios ecológicos. Hanski murió de cáncer en mayo de 2016.

Obras principales

1991 *Metapopulation dynamics.*
1999 *Metapopulation ecology.*
2016 *Messages from islands.*



LOS ORGANISMOS CAMBIAN Y CONSTRUYEN EL MUNDO EN EL QUE VIVEN

CONSTRUCCIÓN DE NICHOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
F. John Odling-Smee
(n. 1935)

ANTES
1969 El biólogo británico Conrad Waddington escribe sobre las maneras en que los animales cambian su medio, en lo que llama «sistema de explotación».

1983 Richard Lewontin, biólogo estadounidense, afirma que los seres vivos son constructores activos de su medio en *Gene, organism, and environment*.

DESPUÉS
2014 El ecólogo canadiense Blake Matthews esboza criterios para decidir si un organismo es un constructor de nichos.

Todos los organismos alteran el medio para satisfacer sus propias necesidades. Los animales cavan madrigueras, construyen nidos, crean sombra para protegerse del sol y se refugian del viento, mientras que las plantas alteran la química del suelo y reciclan nutrientes. Cuando los seres vivos modifican su lugar y el de otros en el medio, hablamos de «construcción de nicho», término acuñado por el biólogo evolutivo británico F. John Odling-Smee en 1988.

El biólogo evolutivo estadounidense Richard Lewontin había defendido antes que los animales no eran víctimas pasivas de la selección natural, y que construyen y modifican activamente su medio, afectando a su propia evolución en el proceso: el lince y el conejo, por ejemplo, dan forma a la evolución el uno del otro, al competir por correr más. Análogamente, Odling-Smee argumentaba que la construcción de nicho y la «herencia ecológica» –recursos y condiciones heredados, como la química alterada del suelo, que pasan a los descendientes– deben verse como procesos evolutivos.



Las liebres no se dedican a crear linces, pero, en un sentido fundamental, lo hacen.
Richard Lewontin

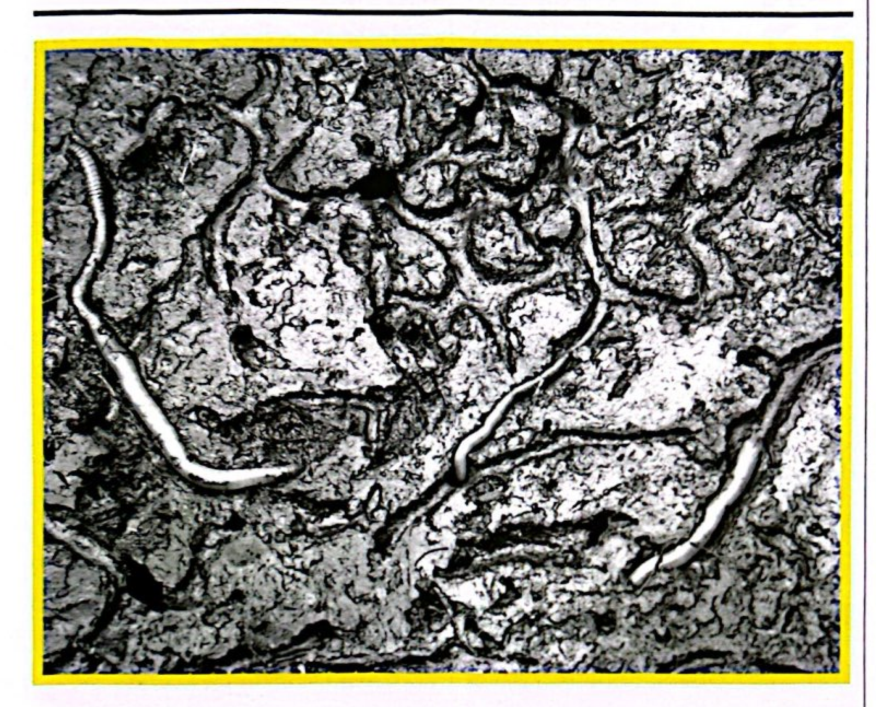


Niveles de construcción

Algunos ejemplos comunes de construcción de nicho son obvios, y otros operan a escala microscópica. Los castores construyen presas en los ríos, alterando su curso y creando lagos. Esto altera la composición del agua y de los materiales que arrastra la corriente, crea nuevos hábitats que aprovechan otros seres vivos y cambia también la composición de las comunidades vegetales y animales del río. El biólogo británico Kevin Laland ha señalado que, mientras que las presas de los castores son claramente de gran importancia evolutiva y ecológica, el impacto de sus excrementos puede ser también importante.

Las lombrices son constructoras de nichos muy eficaces que trans-

Véase también: Nichos ecológicos 50–51 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Los organismos y su medio 166 ▪ El gremio ecológico 176–177



Las lombrices dejan vermicompostas, que son un fertilizante natural valioso. Además de transformar el suelo para sí, ayudan a las plantas a crecer.

forman constantemente el suelo en el que viven: descomponen la materia vegetal y mineral en partículas lo bastante pequeñas como para poder ser ingeridas por las plantas; y la vermicomposta que segregan es cinco veces más rica en nitrógeno aprovechable, siete veces más en fosfatos y unas once veces más en potasio que el suelo que las rodea.

De modo similar, las diatomeas microscópicas de los sedimentos del lecho marino segregan sustancias químicas que cohesionan y estabilizan la arena. Por ejemplo, en la bahía de Fundy en Canadá, los cambios en el estado del lecho debidos a las diatomeas permiten que sea colonizado por otros organismos, como el crustáceo *Corophium volutator*.

Los biólogos británicos Nancy Harrison y Michael Whitehouse han propuesto que las aves, cuando forman bandadas mixtas –como hacen muchas de ellas fuera de la época de cría–, cambian su relación con sus competidores para encontrar más recursos alimenticios y protegerse mejor de los depredadores. El medio social complejo que crean modifica su propia ecología y comportamiento.

En su explicación de la construcción de nichos, Odling-Smee señalaba a las antiguas cianobacterias, que produjeron oxígeno como producto de desecho de la fotosíntesis hace más de dos mil millones de años. Esto fue clave de la Gran Oxidación, que cambió la composición de la atmósfera terrestre y los océanos, produciendo así una modificación masiva del medio. El aporte de oxígeno ayudó a crear las condiciones para la evolución de formas de vida mucho más complejas, incluidos los seres humanos. ■

Ingenieros de ecosistemas

A los constructores de nichos se les llama ingenieros de ecosistemas, una expresión acuñada en 1994 por los científicos Clive Jones, John Lawton y Moshe Shachak. Hay dos tipos de ingenieros.

Los alogénicos alteran los materiales mecánicamente, como los castores (al construir presas), los pájaros carpinteros (al hacer nidos) y los seres humanos (al extraer grava). Tales actividades modifican la disponibilidad de recursos para otras especies. Cuando los pájaros carpinteros abandonan el nido, lo ocupan otros animales pequeños. Si el agua inunda una gravera, la pueden colonizar patos y libélulas.

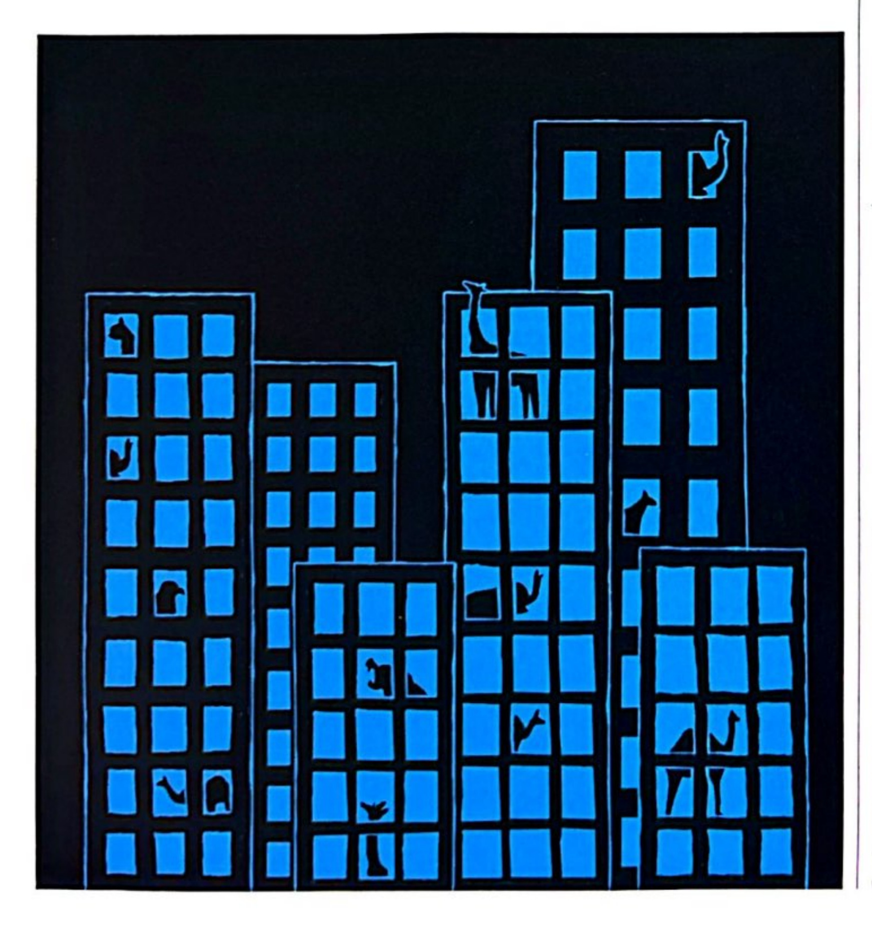
Los autogénicos, al crecer, crean nuevos hábitats. Por ejemplo, un roble maduro es un medio adecuado para una gama mayor de insectos, aves y mamíferos pequeños que un retoño de roble. Asimismo, un arrecife de coral alberga más peces y crustáceos a medida que crece.



Un estornino pinto, en Arizona (EE UU), aprovecha el hueco dejado por un pájaro carpintero para hacer su nido.

COMUNIDADES LOCALES QUE INTERCAMBIAN COLONIZADORES

METACOMUNIDADES



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Mathew Leibold (n. 1956)

ANTES
1917 Arthur Tansley observa que dos especies de plantas *Galium* no crecen igual en parcelas diferentes.

1934 Gueorgui Gause plantea el principio de exclusión competitiva: dos especies que compiten por el mismo recurso clave no pueden coexistir mucho tiempo.

2001 En la teoría neutral de Stephen Hubbell, la biodiversidad surge por azar.

DESPUÉS
2006 Mathew Leibold y Marcel Holyoak, ecólogos estadounidenses, refinan y desarrollan la teoría de metacomunidades.

Una de las limitaciones de la ecología de comunidades tradicional es que tendía a considerar estas de modo exclusivamente local, sin tener casi en cuenta lo que ocurre a distintas escalas o en distintos lugares. Por ello, en las últimas décadas, los ecólogos han estado desarrollando teorías sobre metacomunidades, cuyo concepto se explica en un trabajo clave de 2004 bajo la dirección del ecólogo estadounidense Mathew Leibold.

La idea de metacomunidades está vinculada a la de metapoblaciones: mientras que los estudios de estas últimas examinan los ámbitos en los que coexisten poblaciones de una especie, en la teoría de metacomunidades los ámbitos consisten en comunidades enteras que incluyen a varias especies que interactúan.

Véase también: El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ La teoría neutral de la biodiversidad 152 ▪ Metapoblaciones 186–187



Las cabras blancas de Colorado (EE UU) viven en una metacomunidad de especies en una cordillera (las Montañas Rocosas) y en una población de cabras, en cada uno de los picos.

¿Qué es una comunidad?

En esencia, las metacomunidades son grupos o conjuntos de comunidades. Las que conforman una metacomunidad están separadas en el espacio, pero no están completamente aisladas ni son independientes, sino que interactúan por medio de las diversas especies que se mueven entre unas y otras. Una metacomunidad puede consistir, por ejemplo, en una serie de comunidades de bosque separadas, diseminadas en un área dada. Las diversas especies en cada parcela de bosque interactúan como comunidad independiente. Ciertas especies, sin embargo, como los ciervos o los conejos, pueden migrar o dispersarse a otra comunidad de la metacomunidad, mudándose a otra parcela de bosque en busca de mejores oportunidades para alimentarse, refugiarse o criar. Los distintos tipos de hábitat influirán en este equilibrio entre desarrollo interconectado e independiente. La teoría de metacomunidades ofrece un marco para estudiar cómo y por qué surgen variaciones y su impacto sobre la biodiversidad y las fluctuaciones de población.

Local frente a regional

Una ventaja de contemplar las comunidades desde esta perspectiva espacial es que puede ayudar a resolver observaciones aparentemente contradictorias. Así, un estudio ecológico podría considerar cómo viven e interactúan las especies de una pequeña comunidad local, y, desde esta perspectiva concreta y limitada, hallar que la competencia por los recursos es un factor clave en su funcionamiento; y, a su vez, un macroestudio que examinara la situación en una comunidad de ámbito mayor podría descubrir que la competencia apenas tiene papel alguno. ¿Cuál es la conclusión correcta? Podría decirse que ambas lo son, y que la diferencia dependería solo »

Pasos de fauna



Muchas especies pasan de una a otra parcela de hábitat separada. Esto puede darse estacionalmente, como en las migraciones anuales, por desastres anuales, como incendios o inundaciones, o a lo largo de mucho tiempo. Ello permite contactos clave para la salud y supervivencia de especies y comunidades, renovándolas o aportando recursos nuevos en momentos decisivos. Este flujo natural de uno a otro hábitat está siendo interrumpido cada vez más por barreras de origen humano como bosques despejados para la agricultura, carreteras, vías férreas y la expansión urbana. La idea de abrir pasos para la vida salvaje no es nueva. Por ejemplo, las escaleras de peces para sortear presas tienen siglos de antigüedad. Los pasos de fauna –como los puentes para osos en Canadá o los túneles para las tortugas del desierto en California– son cada vez más habituales. Se han construido miles, entre ellos, puentes, pasos subterráneos y viaductos –a menudo cubiertos de vegetación– para conservar hábitats y evitar colisiones fatales entre vehículos y animales.

de la escala. La teoría de metacomunidades permite a los ecólogos reconciliar tales discrepancias y buscar explicaciones a escala tanto regional como local.

Una metacomunidad puede ser un conjunto de media docena de árboles caducifolios en un parque, siendo cada árbol una comunidad individual; pero igualmente podría consistir en todos los bosques caducifolios de las zonas templadas de todo el mundo. Lo que la teoría de metacomunidades les permite a los ecólogos es trabajar a cualquier escala, al menos en teoría.

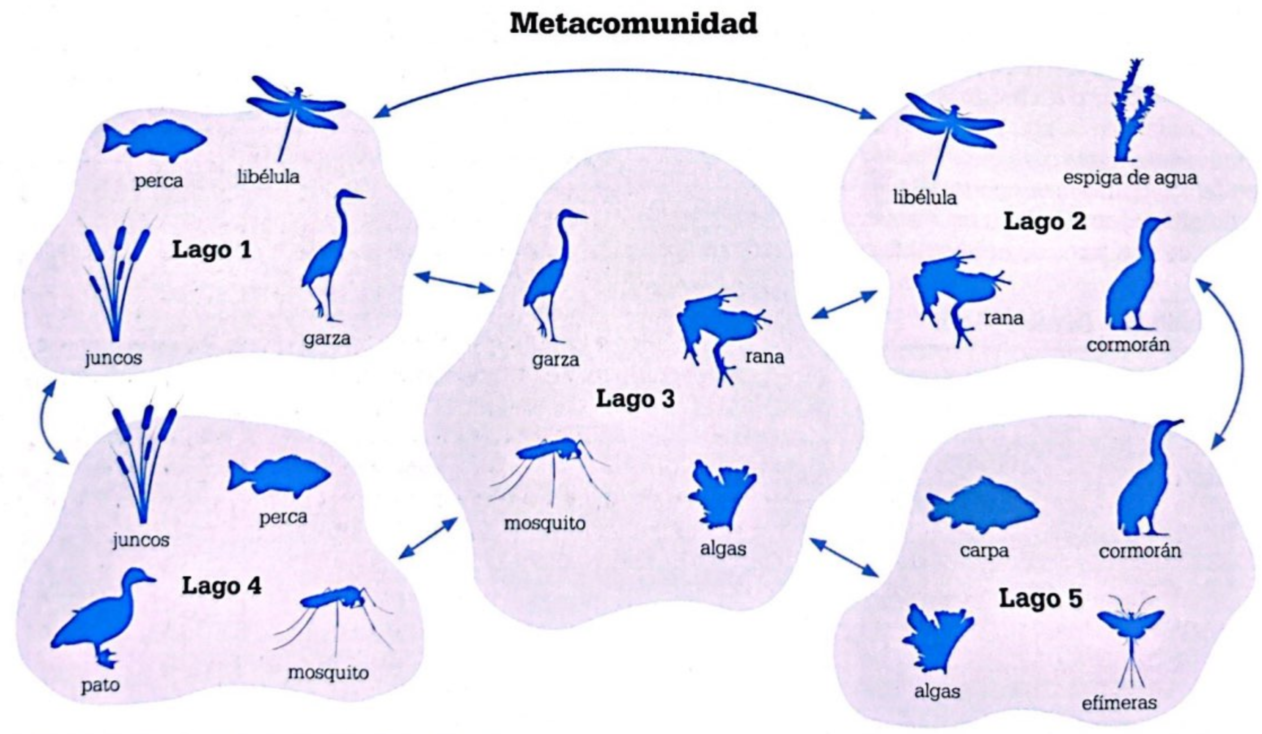
Un marco global

Según Mathew Leibold, el estudio de las metacomunidades reúne muchas ramas aparentemente dispares de la ecología y teorías en aparente conflicto. Ello puede ayudar a resolver el debate de hace ya un siglo entre la teoría «determinista» y basada en nichos de la ecología de comunidades –en la que el nicho ecológico de cada especie determina la diversidad de las especies–, y la teoría «estocástica» (aleatoria), que subraya la importancia de la colonización por azar y la deriva ecológica (fluctuaciones aleatorias del tamaño de las poblaciones).

La teoría de metacomunidades proporciona un marco global para observar cómo interactúan procesos deterministas y estocásticos para formar comunidades naturales, y permite a los ecólogos constatar que los patrones de la biodiversidad están determinados tanto por rasgos biológicos locales (como la proporción de luz y sombra en las pozas de marea o las variaciones de la calidad del agua de las corrientes) como por procesos estocásticos regionales (como la difusión de una especie por una tormenta inusual o una extinción debida a una epidemia). También sirve para explicar que el efecto combinado de cambios locales puede causar un cambio regional.

Encontrar metacomunidades

Uno de los problemas del concepto de Leibold es que, en la práctica, no es tan sencillo identificar los componentes separados de una metacomunidad. Para los peces y otros animales acuáticos en distintos lagos de una región lacustre, cada lago puede ser una comunidad claramente definida. Para las aves capaces de volar de un lago a otro en unos minutos, en cambio, los distintos lagos son todos parte de la misma comunidad única. Esto podría explicar por qué gran parte del trabajo y los estudios



Este esquema de metacomunidad muestra cómo se mueven especies entre lagos para alimentarse o criar. El viento dispersa las semillas y esporas de las algas.



Las pozas de marea en una plataforma formada por el oleaje forman una metacomunidad en Eysturoy, en las islas Feroe. Con marea baja, las pozas están separadas, y se unen con la alta.

de este tipo han sido hasta ahora teóricos y abstractos, en lugar de centrados en el trabajo de campo. Algunas metacomunidades son fáciles de identificar, como las islas en un archipiélago o las pozas de marea separadas con marea baja y unidas cuando esta sube. En su documento de trabajo de 2004, Leibold y sus colegas consideraban que las comunidades locales o parcelas no siempre tienen límites definidos que hagan aparente su separación, y que distintas especies pueden responder a los mismos fenómenos a escala diferente. Identificaron tres tipos de metacomunidad: parcelas claramente separadas; parcelas separadas pero de vida breve que aparecen periódicamente en un hábitat con tamaño variable; y parcelas permanentes con límites poco definidos.

Parcelas separadas

Las parcelas más obviamente separadas son las islas del océano, un tema de estudio práctico con una vasta literatura sobre biogeografía de islas que se remonta al estudio de Charles Darwin sobre las variaciones entre los pinzones de las Galápagos, en el Pacífico. Las parcelas definidas son un objeto de estudio atractivo que ha captado la atención de los ecólogos de comunidades, pero, como es natural, las aves y muchos otros organismos transportados por el viento o las corrientes garantizan que ni siquiera las comunidades isleñas estén del todo aisladas. Por esta razón, algunos estudios de metacomunidades se centran en el espacio entre comunidades, incluso cuando estas son definidas, como en el caso de estanques y lagos, y en cómo las especies se mueven entre ellas.

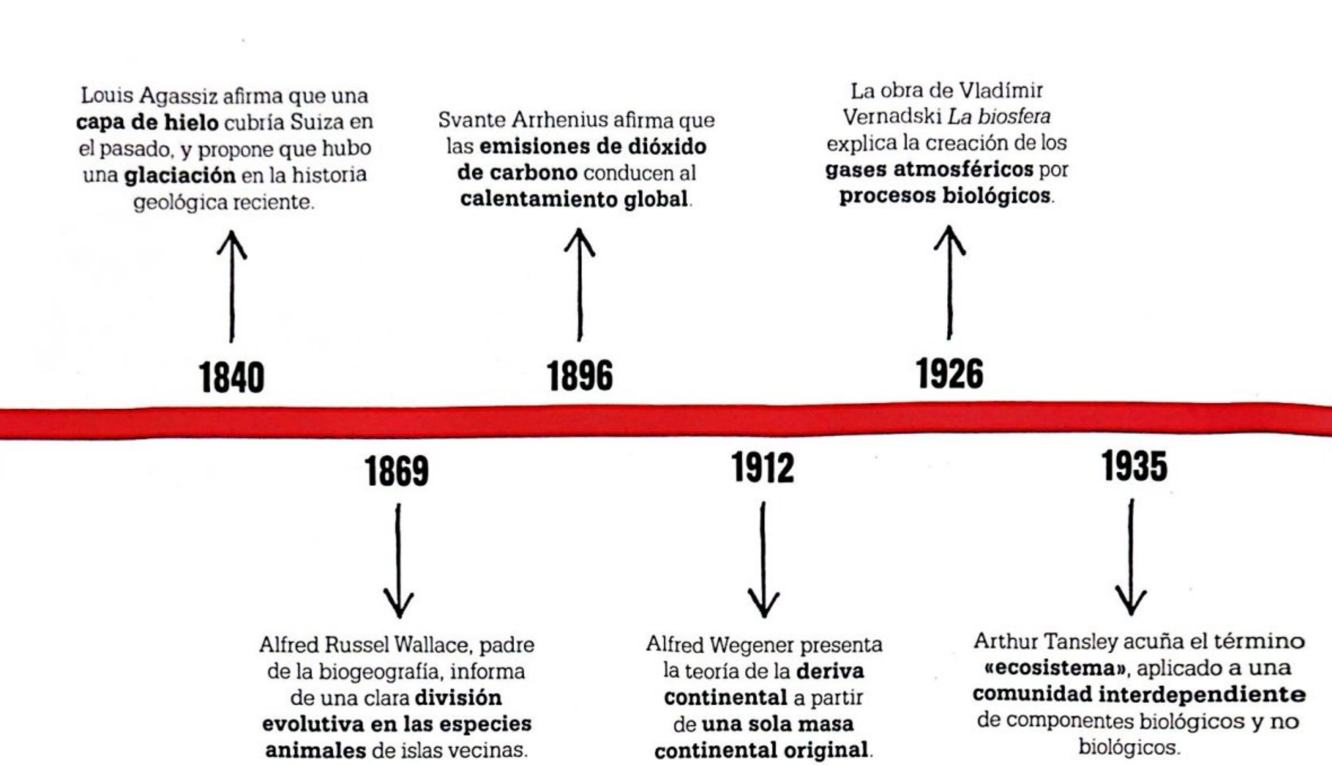
Las parcelas definidas pero de corta duración pueden ser mucho más difíciles de identificar, por su mismo carácter efímero. Los ecólogos, sin embargo, han realizado estudios de metacomunidades de huecos en los árboles que quedan llenos de agua durante un tiempo tras las tormentas, de parcelas de cuerpos fructíferos fúngicos que viven solo unos días o semanas e incluso de plantas atrapamoscas que, tras recibir rocío o lluvia, ofrecen un breve hogar acuático tanto a bacterias como a insectos.

Comunidades difusas

El documento de trabajo de 2004 de Leibold reconocía que las metacomunidades de límites difusos son quizá las más difíciles de definir. Los arrecifes de coral, por ejemplo, pueden parecer claramente delimitados, pero muchas de las especies que viven entre ellos nadan libremente y responden a numerosas influencias exteriores, tales como cambios en las corrientes oceánicas. Como la mayor parte de la vida del planeta vive en tales parcelas poco definidas, los teóricos han intentado aportar claridad. Leibold y sus colegas propusieron dos maneras diferentes de identificar metacomunidades para su estudio: comunidades separadas insertas en un hábitat matriz, tal como los claros de un bosque rico en recursos; y parcelas de muestra al azar en un hábitat continuo, como sería un círculo aleatorio de árboles en un bosque.

La tarea se halla aún en una fase temprana. El mundo está entrando en una crisis de la biodiversidad, y muchas especies y comunidades parecen amenazadas por los efectos de la actividad humana. La teoría de metacomunidades podría ayudar a comprender mejor cómo responderán las comunidades naturales y cómo pueden difundirse cambios locales por una región más amplia, sea de forma adversa o positiva. ■

LA TIERRA VIVA



Durante siglos, los científicos de Occidente trataron de reconciliar los hallazgos de los geólogos y buscadores de fósiles con la interpretación literal de relatos bíblicos como el de la Creación y el del Diluvio Universal. En 1654, el arzobispo James Ussher fechó la creación de la Tierra el 22 de octubre de 4004 a.C. Una serie de hallazgos posteriores pusieron en tela de juicio tales interpretaciones, y condujeron a ideas nuevas sobe la historia dinámica de la vida en la Tierra.

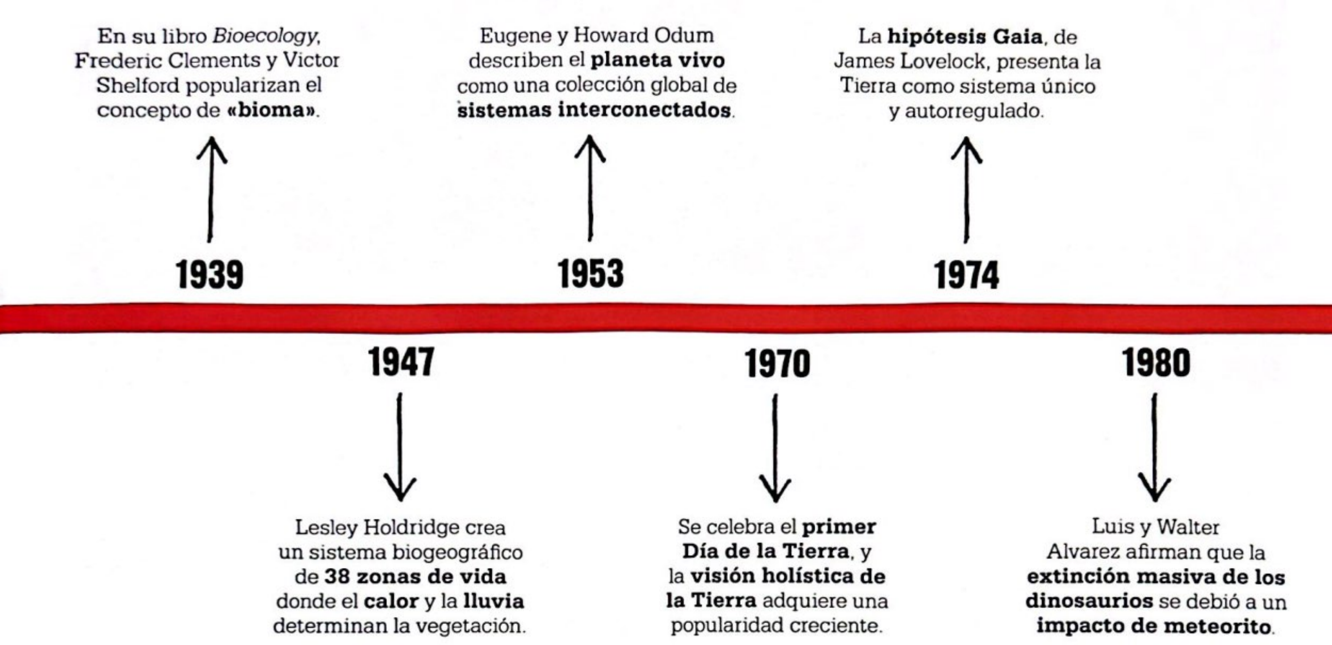
Pruebas en las rocas

James Hutton y Charles Lyell, geólogos escoceses, contribuyeron al conocimiento de la edad de la Tierra. En *Theory of the Earth* (1795), Hutton defendió que los ciclos repetidos de sedimentación y erosión necesarios para crear miles de metros de estratos de roca indicaban un origen mucho más antiguo, idea que desarrolló Lyell en la década de 1830. Poco después, el geólogo suizo-estadounidense Louis Agassiz atribuyó la topografía de algunas regiones a las glaciaciones. Hutton y Lyell observaron también que ciertos fósiles de animales y plantas desaparecían del registro zoológico, lo cual, para Lyell, era prueba de extinción, en contra de la noción imperante de la inmutabilidad de las especies.

Los fósiles daban también pistas del movimiento de los continentes. El meteorólogo alemán Alfred Wegener observó que había fósiles semejantes a ambos lados del Atlántico sur, separados por miles de kilómetros, lo cual citó en su teoría de la deriva continental de 1912 como prueba de que los continentes habían estado unidos. No se conoció un mecanismo viable para un desplazamiento semejante hasta la década de 1960, cuando los geofísicos hallaron patrones de anomalías magnéticas en franjas paralelas a ambos lados de las dorsales mesoceánicas, e identificaron el proceso de expansión del fondo oceánico: magma caliente que asciende por grietas de la corteza oceánica y forma corteza nueva a medida que se enfría y aleja. Este proceso gradual mueve y da forma a los continentes.

El nacimiento de la biogeografía

En la era de los descubrimientos a partir del siglo XVI, los científicos comenzaron a estudiar la distribución geográfica de plantas y animales. En la década de 1860, para Alfred Russel Wallace, dicha distribución, definida por barreras físicas como cor-



dilleras y océanos, era un argumento clave en favor de la evolución. Wallace observó, por ejemplo, que los estrechos oceánicos marcaban una división clara entre la flora y fauna de Australasia y el Sureste Asiático.

Al comprender mejor la biogeografía de la Tierra, los ecólogos del siglo xx dividieron el planeta en biomas: comunidades extensas de flora y fauna que interactúan en distintos hábitats, como desiertos o tundras. El botánico Leslie Holdridge refinó el concepto en 1947 con su clasificación de zonas de vida, en la que cartografió zonas basándose en dos influencias clave sobre la vegetación: temperatura y precipitaciones.

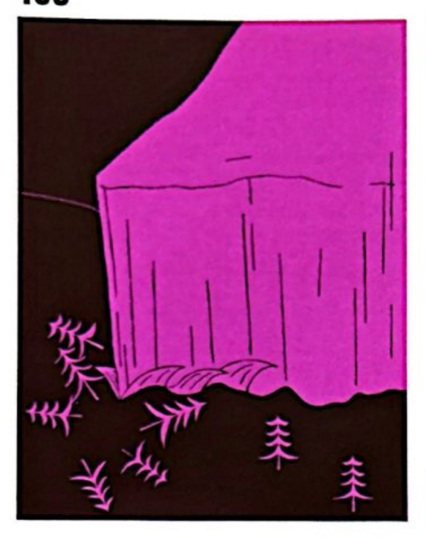
Un enfoque holístico de la Tierra

El geólogo austriaco Eduard Suess acuñó el término «biosfera» en 1875 para referirse a toda la superficie terrestre o sus proximidades donde puede existir vida orgánica. En 1926, el geoquímico ruso Vladímir Vernadski explicó la interacción estrecha entre la roca (litosfera), el agua (hidrosfera) y el aire (atmósfera), y esto a su vez inspiró el enfoque holístico de la ecología del biólogo estadounidense Eugene Odum. Para Odum, no era posible comprender un solo organismo, o grupo de ellos, sin estudiar el ecosistema en que viven, y llamó «nueva ecología» a esta perspectiva.

En 1974, el científico británico James Lovelock propuso la hipótesis Gaia, en la que la interacción de los elementos vivos y no vivos de la biosfera conforma un sistema complejo y autorregulado que perpetúa las condiciones para la vida. Casi dos siglos antes, Hutton había expresado una idea similar: los procesos biológicos y geológicos están interrelacionados, y la Tierra se puede ver como un superorganismo. En palabras de Hutton, «el globo de esta Tierra no solo es una máquina, sino también un ente organizado, ya que tiene capacidad de regeneración».

¿Hacia la extinción?

La vida ha sobrevivido en la Tierra durante miles de millones de años, pese a los estragos de cinco extinciones masivas, pero los ecologistas se preguntan si podrá sobrevivir a otra. Hay quien cree que la sexta extinción masiva ha comenzado ya, debido a la actividad humana. Si la hipótesis Gaia de Lovelock es acertada, sin embargo, parece probable que el planeta sobreviva, aunque no lo hagan los seres humanos ni muchas otras formas de vida actuales. ■



EL GLACIAR FUE EL GRAN ARADO DE DIOS

ANTIGUAS GLACIACIONES

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Louis Agassiz (1807–1873)

ANTES
1795 El geólogo escocés James Hutton defiende que los bloques erráticos (fragmentos de roca distinta a la roca que los rodea) fueron transportados por glaciares.

1818 En Suecia, el naturalista Göran Wahlenburg publica su teoría de que el hielo cubría Escandinavia en el pasado.

1824 El mineralogista danés-noruego Jens Esmark propone que los glaciares eran antes mayores y más gruesos, y que cubrían gran parte de Noruega y el lecho marino adyacente.

DESPUÉS
1938 El matemático serbio Milutin Milanković publica una teoría para explicar la recurrencia de las glaciaciones, basada en cambios de la órbita terrestre.

A inicios del siglo XIX, había dos explicaciones contradictorias acerca del desarrollo de los rasgos del paisaje, las plantas y los animales. Los partidarios del catastrofismo creían que una serie de traumas destructivos, como el Diluvio bíblico, habían reformado la superficie del planeta en repetidas ocasiones, transformando las montañas, los lagos y los ríos, y eliminando muchas especies de plantas y animales. Los defensores del uniformismo, en cambio, mantenían que los accidentes geográficos se debían a procesos continuos y uniformes de erosión, sedimentación y vulcanismo.

Unos estudios geológicos detallados mostraron que ambos bandos se equivocaban, y que la historia de la Tierra había sido un proceso de cambio lento, interrumpido por episodios catastróficos. El estudio de los glaciares y los rasgos geográficos que crean dio pie a tales ideas. Tras observar estriaciones paralelas en las rocas de los Alpes suizos, el geólogo germano-suizo Jean de Charpentier (o Johann von Charpentier) afirmó que los glaciares alpinos habían sido más extensos en el pasado y que habían producido las estriaciones al moverse y cortar sus sedimentos la roca. El geólogo Jens Esmark llegó a conclusiones similares en Noruega.



Los animales entran en el arca de Noé en una representación del bíblico Diluvio Universal. Los catastrofistas creían que el Diluvio había sido una de las catástrofes que habían conformado la geología terrestre.

Movimientos glaciares

Las ideas de Charpentier y Esmark fueron desarrolladas por el zoólogo suizo Louis Agassiz, quien, en 1837, propuso que gran parte del hemisferio norte estuvo cubierto de hielo, desde el Polo Norte hasta las costas del Mediterráneo y el Caspio. Agassiz realizó también algunos estudios del movimiento de los glaciares suizos, y publicó *Études sur les glaciers* en 1840. El mismo año visitó al

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ La curva de Keeling 240–241 ▪ La reducción del ozono 260–261 ▪ Adelanto primaveral 274–279



Convergencia de glaciares en Piz Argient, montaña de los Alpes suizos. Como otros glaciares de los Alpes, estos fueron mucho más extensos que hoy, y continúan menguando.

geólogo William Buckland en Escocia para estudiar los rasgos glaciares allí, lo cual animó al glaciólogo escocés James Forbes a realizar estudios similares en los Alpes franceses.

En algunos círculos, como el de la Iglesia católica, se seguía defendiendo que las estriaciones glaciales eran consecuencia de un diluvio, o que los grandes depósitos de cieno y roca habían sido transportados por icebergs barridos por el diluvio. A partir de la década de 1860, la teoría de las glaciaciones de Agassiz y la idea de que los glaciares de los Alpes suizos y Noruega habían sido mucho mayores fue siendo generalmente aceptada. También se aceptó que una capa de hielo había cubierto una vez Europa y América del Norte desde el Ártico, con implicaciones catastróficas para plantas y animales.

A finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, las expediciones a Groenlandia y la Antártida mostraron que ambas estaban cubiertas de hielo. Los estudios aéreos de las décadas de 1920 y 1930 confirmaron la vasta extensión de sus inlandsis, hoy definidos como áreas de hielo glaciar de más de 50 000 km^2; hay otras áreas glaciares menores, como Vatnajökull, en Islandia.

Posteriormente se hallaron pruebas de que no había habido solo una glaciación, sino al menos cinco grandes glaciaciones en la historia de la Tierra. La más reciente, la del Cuaternario, comenzó hace 2,58 millones de años, y continúa. En los últimos 750 000 años, ha habido ocho periodos de avance de los hielos (glaciales) y de retirada (interglaciales). Durante el último periodo glacial, que acabó hace entre 10 000 y 15 000 años, las capas de hielo alcanzaban los 4 km de grosor, y el nivel del mar era 120 m más bajo. ■

Retroceso de glaciares y migración de aves

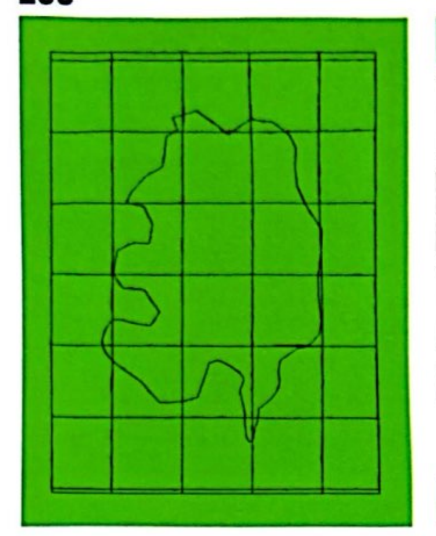
Al comenzar el fin del último periodo glaciar, hace unos 26 500 años, la Tierra era mucho más fría que hoy día. El hielo cubría gran parte de América del Norte y el norte de Eurasia, en un medio tan inhóspito que la mayoría de las aves vivían en regiones tropicales y subtropicales, donde abundaba más el alimento.

A medida que las temperaturas ascendían, el hielo menguaba, dejando un nuevo paisaje al descubierto. El terreno libre de hielo y los veranos breves y húmedos eran ideales para los insectos, y con ellos llegaron también las aves. Al acortarse los días en otoño, algunas aves se quedaban a pasar el invierno, pero otras volvían al sur.

Al retroceder el hielo, la distancia recorrida por las aves al regresar se fue alargando, hasta acabar dándose largas migraciones en primavera y otoño entre los trópicos y las latitudes septentrionales. Entre las aves que emprenden el viaje están las golondrinas, las currucas y los cucos.



Macho de oropéndola de Baltimore posado en un helecho en Costa Rica. La especie vuela al norte en marzo, y vuelve a los trópicos en agosto o septiembre.



NO HAY NADA EN EL MAPA QUE MARQUE EL LÍMITE

BIOGEOGRAFÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Alfred Russel Wallace (1823–1913)

ANTES
1831–1836 Los estudios de Darwin confirman que muchos animales de un área dada no viven en hábitats similares de otras áreas.

DESPUÉS
1874 El zoólogo británico Philip Sclater divide las aves por regiones zoogeográficas.

1876 Alfred Russel Wallace publica *The geographical distribution of animals*, primera obra extensa sobre biogeografía.

1975 El biogeógrafo húngaro Miklos Udvardy propone dividir en provincias los ámbitos biogeográficos.

2015 J. J. Morrone, biólogo evolutivo mexicano, propone un código internacional de nomenclaturas de áreas biogeográficas.

Los lugares donde viven las plantas y los animales suelen variar de manera regular en función de factores como la latitud, la altura y el tipo de hábitat. El estudio de estas variaciones es la biogeografía. Una de sus ramas, la fitogeografía, se ocupa de la distribución de las plantas, mientras que la otra, la zoogeografía, analiza la distribución de los animales. Al naturalista y biólogo británico Alfred Russel Wallace se le suele considerar como el padre de la biogeografía. En el siglo XVIII, al registrar los exploradores las plantas y los animales que se encontraban, comenzó a emerger una perspectiva del cambio geográfico. En la gran expedición del *Beagle* (1831–1836), Charles Darwin vio especies de aves en las islas Malvinas que no vivían en la tierra firme de América del Sur, tortugas gigantes exclusivas de las Galápagos y marsupiales semejantes a los canguros de Australia. Estaban encajando nuevas piezas del rompecabezas biogeográfico.

Regiones zoogeográficas del mundo



Las seis regiones zoogeográficas de Wallace comenzaron con la línea que propuso en 1859 para separar la fauna del sur y sureste de Asia y de Australasia.

Véase también: Evolución por selección natural 24–31 ▪ La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163 ▪ Biomas 206–209

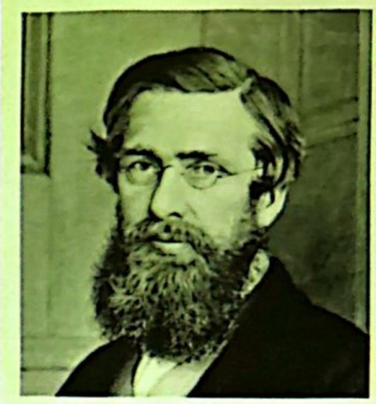


Toda Siberia se halla en la región Paleártica, y los abedules blancos siberianos de la imagen pertenecen a una subdivisión llamada taiga de Siberia oriental.

A partir de 1848, Wallace dedicó años a realizar estudios de campo en América del Sur y en el Sureste Asiático. Wallace estudió los hábitos alimenticios, reproductivos y migratorios de miles de especies, prestando una atención especial a la distribución de los animales en función de la presencia o ausencia de barreras geográficas, tales como el mar entre islas. Wallace concluyó que el número de organismos que viven en una comunidad depende del alimento disponible en el hábitat concreto en que viven.

La línea de Wallace

Durante la expedición de 1854–1862 al archipiélago malayo, Wallace reunió la asombrosa cantidad de 126 000 especímenes, muchos de ellos de especies desconocidas para la ciencia occidental, y que incluían el 2% de las especies de aves del mundo. Wallace consideraba que la biogeografía apoyaba la teoría de la evolución por selección natural. Uno de los hallazgos más importantes de Wallace fue la diferencia marcada entre las especies de aves a uno y otro lado de la llamada línea de Wallace, que discurre por el estrecho de Macasar (entre las islas de Borneo y las Célebes) y el estrecho de Lombok (entre Bali y Lombok). Esta línea separa la fauna de Asia de la de Australasia, y Wallace observó que no la cruzaban los mamíferos mayores ni la mayoría de las aves. Por ejemplo, solo hay tigres y rinocerontes en el lado asiático, y babirusas, marsupiales y cacatúas galerita solo en el otro lado. Wallace también señaló las diferencias acusadas que hay entre los animales de América del Norte y del Sur, y, en 1876, propuso seis regiones zoogeográficas: Neártica (América del Norte), Neotropical (América del Sur), Paleártica (Europa, el norte de África y la mayor parte de Asia), Afrotropical (África subsahariana), Indomalaya (sur y sureste de Asia), y Australasia (Australia, Nueva Guinea y Nueva Zelanda). Las regiones de Wallace, junto con Oceanía (las islas del océano Pacífico) y la Antártida, se conocen como reinos biogeográficos. ▪

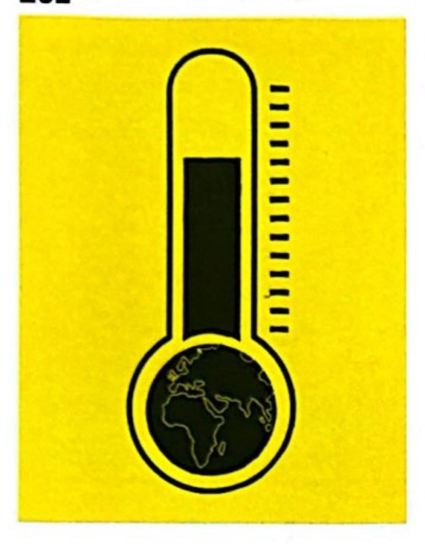


Alfred Russel Wallace

El explorador, naturalista, geógrafo y reformador social Alfred Russel Wallace abandonó la escuela a los catorce años de edad, y fue agrimensor antes que profesor. Después de un encuentro con el entomólogo Henry Bates, le fascinaron los insectos, y en 1848 emprendieron juntos una expedición de cuatro años a la cuenca del Amazonas en busca de especímenes. Llevó a cabo otras al Orinoco y al archipiélago malayo, y llegó a la misma conclusión sobre el origen de las especies por selección natural que Charles Darwin, y sus respectivos trabajos se presentaron juntos en 1858. Wallace, autoridad mundial sobre distribución de la fauna, concienció también al público acerca del impacto humano sobre el medio.

Obras principales

1869 *Viaje al archipiélago malayo.*
1870 *Contributions to the theory of natural selection.*
1876 *The geographical distribution of animals.*
1878 *Tropical nature, and other essays.*
1880 *Island life.*



EL CALENTAMIENTO GLOBAL NO ES UNA PREDICCION. ESTA OCURRIENDO

CALENTAMIENTO GLOBAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Svante Arrhenius
(1859–1927)

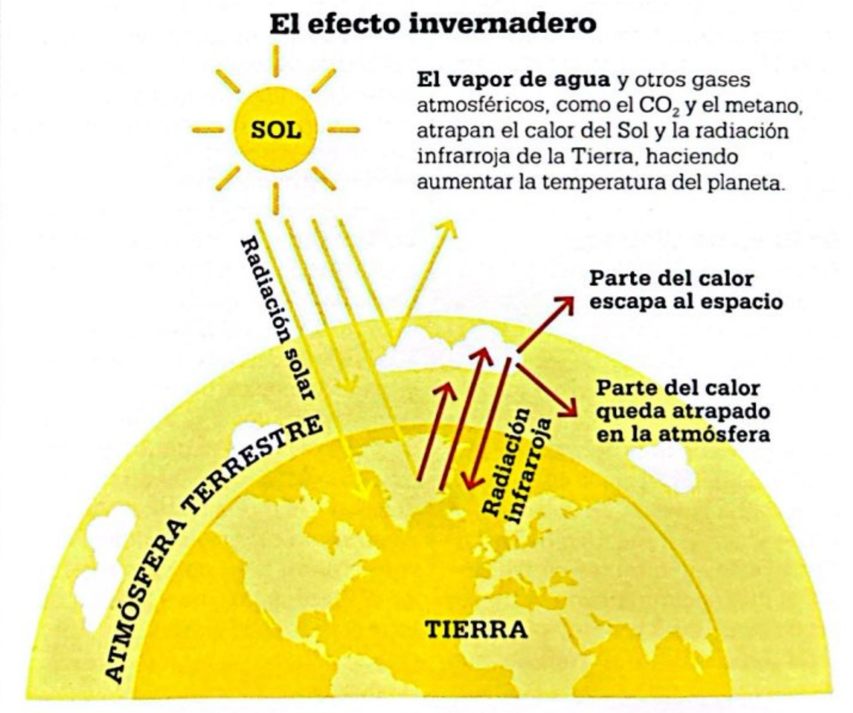
ANTES
1824 El físico francés Joseph Fourier afirma que la atmósfera terrestre atrapa el calor del Sol como un invernadero.

1859 El físico irlandés John Tyndall aporta pruebas experimentales que apoyan hipótesis anteriores sobre la absorción del calor radiante por la atmósfera.

DESPUÉS
1976 Charles Keeling, científico estadounidense, demuestra que, entre 1959 y 1971, los niveles de CO_2 atmosférico subieron un 3,4 % cada año.

2006 En *La catástrofe que viene*, la periodista Elizabeth Kolbert cuenta casos de personas y lugares afectados por el cambio climático.

En 1896, el químico sueco Svante Arrhenius fue el primero en afirmar que las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) causadas por la actividad humana podían conducir al calentamiento global. Arrhenius pensaba que el CO_2 y otros gases de efecto invernadero podían influir en la temperatura media del suelo, y que el nivel creciente de CO_2 elevaría la temperatura mundial. En particular, estimaba que si los niveles de dióxido de carbono se multiplicaban por entre 2,5 y 3, las regiones árticas experimentarían aumentos de temperatura de entre 8 y 9 °C. Arrhenius continuaba el trabajo anterior de los científicos



Véase también: Energías renovables 300–305 ▪ El movimiento verde 308–309 ▪ Detener el cambio climático 316–321

Joseph Fourier y John Tyndall. Fourier se había preguntado por qué la Tierra no es un páramo helado, dado que el Sol está demasiado lejos para calentarlo hasta su temperatura actual. Sabía que las superficies calentadas –como la superficie terrestre– emiten energía térmica, y que la energía térmica irradiada al espacio debería dar como resultado unas temperaturas inferiores en la Tierra. Algo estaba regulando la temperatura, y Fourier teorizó que la atmósfera, compuesta por diversos gases, actuaba como una caja de cristal, conteniendo el aire y manteniéndolo caliente. La hipótesis de Fourier, aunque demasiado simplista, condujo a la teoría del efecto invernadero de la regulación térmica de la Tierra.

John Tyndall fue el primero en demostrar la hipótesis del efecto invernadero de Fourier, con experimentos que mostraban cómo, cuando el hemisferio oscuro de la Tierra se enfría al liberar el calor absorbido durante el día, los gases atmosféricos, sobre todo el vapor de agua, absorben el calor (radiación) y causan el efecto invernadero. Así se mantiene la temperatura de la Tierra a una media de 15 °C, aunque en las últimas décadas la emisión de gases de efecto invernadero por la actividad humana haya elevado la cifra. Los diez años más calurosos nunca registrados son posteriores a 1998.



> Si el planeta fuera un paciente, lo habríamos tratado hace tiempo.
> **Príncipe Carlos de Inglaterra**





> La atmósfera actuaría como el cristal de un invernadero, elevando la temperatura media de la superficie terrestre.
> **Nils Ekholm**
> ***Meteorólogo sueco***



Alimentando el calentamiento

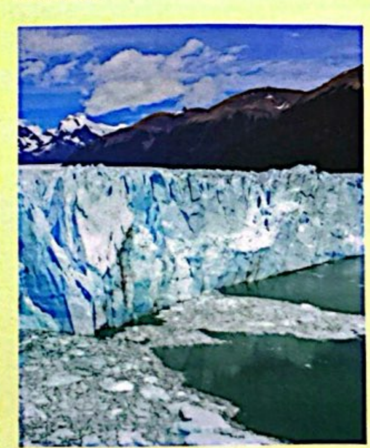
En 1904, a Arrhenius le preocupaba el aumento drástico de los niveles de CO_2 debido a la actividad humana, sobre todo por el uso de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Arrhenius predijo correctamente la influencia de las emisiones sobre la temperatura global, pero acabó llegando a la conclusión de que un aumento de las temperaturas globales tendría un efecto beneficioso sobre el crecimiento vegetal y la producción de alimentos.

Los combustibles fósiles han hecho aumentar los niveles de CO_2 antes de lo que esperaba Arrhenius, aunque el planeta se haya calentado menos de lo que predijo. Hoy, los científicos entienden que el calentamiento global está perjudicando a las personas y al medio, y lo seguirá haciendo mientras las emisiones sigan aumentando. ▪

Los efectos del calentamiento global

Desde el final del siglo XIX, el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico ha aumentado un 25 %, y la temperatura global, unos 0,5 °C. Las pruebas demuestran que estos cambios han contribuido a la fusión de los glaciares y del hielo marino, lo cual causa la subida del nivel del mar –unos 20 cm desde 1880–, y que está dañando los arrecifes de coral. Otros fenómenos derivados son temporadas de incendios más largas, un clima más extremo y cambios en la distribución de animales y plantas, lo cual causa enfermedades, escasez de alimento y extinciones.

Cuánto aumenten las temperaturas globales dependerá de la reducción de las emisiones globales de CO_2, así como de la rapidez con que se reduzcan. Al ritmo actual, se predice una subida de entre 0,3 y 4,6 °C en el año 2100, con el mayor grado de calentamiento en las regiones árticas.



El glaciar Perito Moreno, en la Patagonia Sur, es uno de los pocos que sigue creciendo. La mayoría se están fundiendo lentamente, causando la subida del nivel del mar.



LA MATERIA VIVA ES LA FUERZA GEOLOGICA MAS PODEROSA

LA BIOSFERA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Vladímir Vernadski
(1863–1945)

ANTES
1785 El geólogo escocés James Hutton propone que, para comprender la Tierra, hay que estudiar todas sus interacciones.

1875 Eduard Suess, geólogo austriaco, aplica el término «biosfera» a la parte de la superficie terrestre donde habita la vida.

DESPUÉS
1928 En *Metodología de la clasificación*, el zoólogo ruso Vladímir Beklemishev advierte de que el futuro de la humanidad está ligado de manera irrevocable a la conservación de la biosfera.

1974 El científico británico James Lovelock y la bióloga estadounidense Lynn Margulis publican la hipótesis Gaia, la idea de la Tierra como ente vivo.

Cuatro subsistemas interactúan en la Tierra: la litosfera, o capa exterior rocosa de la Tierra; la hidrosfera, que comprende todo el agua de la superficie terrestre; la atmósfera, formada por capas de gases; y la biosfera, todos los lugares donde hay vida, desde las profundidades oceánicas a las cimas más altas.

El origen de la biosfera es antiguo: los fósiles de organismos unicelulares minúsculos de hace 4280 millones de años apuntan a una edad que es casi la de la propia Tierra. La biosfera incluye todos los medios terrestres y acuáticos, y se extiende a hábitats extremos, como el agua caliente y rica en nutrientes de las fuentes hidrotermales. Suele dividirse en biomas: en desiertos, praderas, océanos, tundra y pluvisilvas tropicales.



La humanidad es una fuerza geológica cada vez más poderosa, y el cambio de su situación en el planeta ha coincidido con este proceso.
Vladímir Vernadski

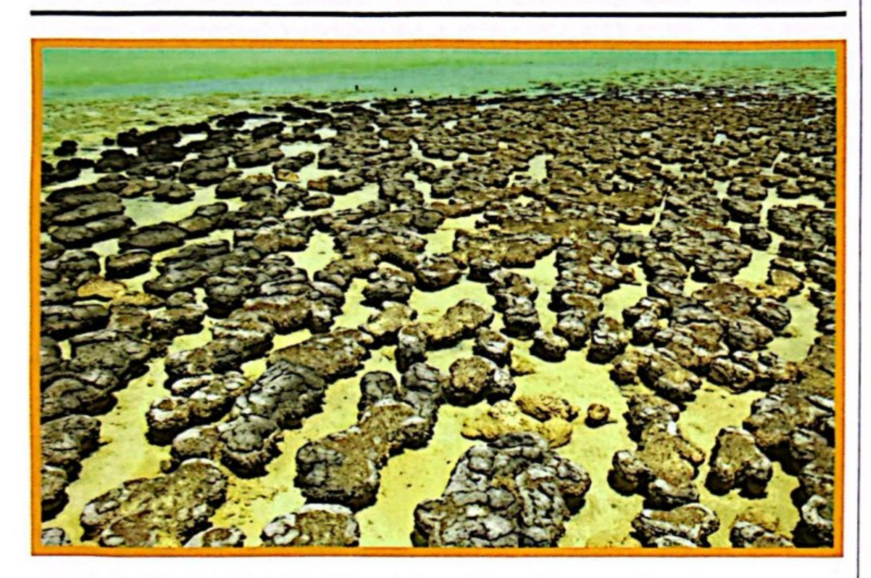


El superorganismo Tierra

Las ideas sobre la biosfera empezaron a surgir en el siglo XVIII, cuando el geólogo escocés James Hutton describió la Tierra como un superorganismo, o ente vivo único. Un siglo más tarde, Eduard Suess introdujo el concepto de biosfera en *Das Antlitz der Erde (La faz de la Tierra)*. Suess explicó que la vida se limita a una zona en la superficie terrestre, y que las plantas son un buen ejemplo de interacciones entre la biosfera y otras zonas: crecen en el suelo de la litosfera, pero las hojas respiran en la atmósfera.

En *La biosfera* (1926), el geoquímico ruso Vladímir Vernadski, quien conoció a Suess en 1911, definió el concepto mucho más en detalle, esbozando una perspectiva de la vida como fuerza geológica importante. Vernadski fue uno de los primeros en reconocer que el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono atmosféricos eran el resultado de procesos biológicos, tales como la respiración

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157 ▪ Una perspectiva holística de la Tierra 210–211



A lo largo de miles de millones de años se han fosilizado capas de cianobacterias para formar estromatolitos, como estos de Hamelin Pool, en la bahía Shark (Australia Occidental).

de plantas y animales, y defendió que los seres vivos dan forma al planeta tanto como otras fuerzas, tales como las olas, el viento y la lluvia. También introdujo la idea de tres fases en el desarrollo de la Tierra: primero, el nacimiento del planeta con la geosfera, en la que solo existía materia inanimada; segundo, el surgimiento de la vida en la biosfera; y, finalmente, la era en que la actividad humana cambió el planeta para siempre, la noosfera.

Interacciones entre esferas

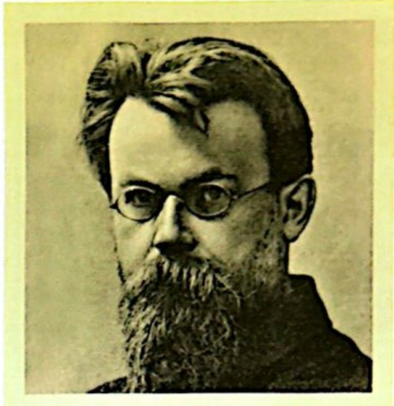
Los científicos creen que la biosfera ha ido cambiando constantemente. Los niveles de oxígeno de la atmósfera comenzaron a subir hace al menos 2700 millones de años, al multiplicarse las cianobacterias. Al aumentar la cantidad de oxígeno, se desarrollaron formas de vida más complejas que darían forma al planeta de distintas formas, erosionando y moldeando su superficie, y también alterando su composición química.

Gradualmente, algunos elementos de la biosfera se integraron en la litosfera. A lo largo de milenios, los corales muertos formaron arrecifes en los mares tropicales poco profundos, y, de modo análogo, los esqueletos calcáreos de billones de organismos marinos se precipitaron al lecho y formaron la piedra caliza. ■



Veo el futuro con gran optimismo. Vivimos en la transición hacia la noosfera.
Vladímir Vernadski





Vladímir Vernadski

Nacido en 1863, Vladímir Vernadski se licenció en la Universidad Estatal de San Petersburgo a los veintidós años, y realizó trabajos de posgrado en Italia y Alemania, donde estudió las propiedades ópticas, elásticas, magnéticas, térmicas y eléctricas de los cristales. Tras la Revolución Rusa fue ministro adjunto de Educación del gobierno provisional. Al año siguiente fundó la Academia Ucraniana de Ciencias, en Kiev. Su obra tardó mucho en ser tomada en serio por los científicos fuera de Rusia; sin embargo, su obra *La biosfera* sería un documento fundacional para elaborar la hipótesis Gaia.

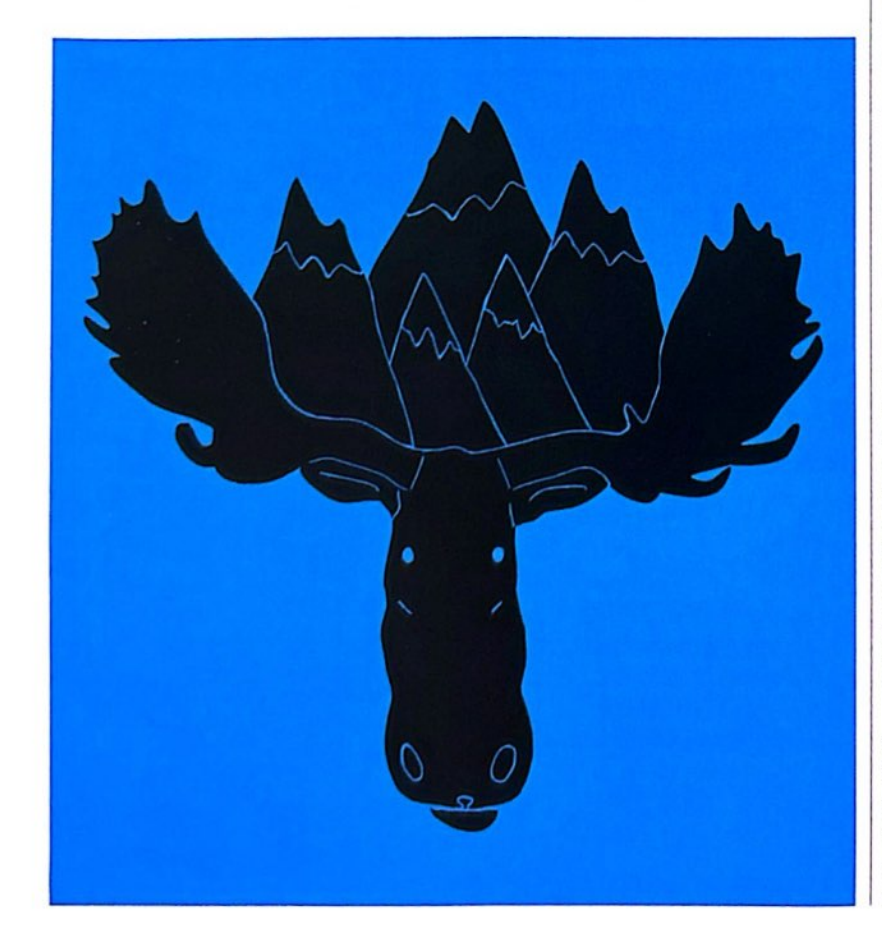
En la década de 1930, Vernadski defendió el uso de la energía nuclear, y trabajó como asesor en el desarrollo del proyecto de la bomba atómica soviética. Murió en 1945.

Obras principales

1924 *Geoquímica*.
1926 *La biosfera*.
1943 «La biosfera y la noosfera».
1944 «Problemas de bioquímica».

EL SISTEMA DE LA NATURALEZA

BIOMAS



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Frederic Clements (1874–1945), **Victor Shelford** (1877–1968)

ANTES
1793 Alexander von Humboldt usa el término «asociación» para la mezcla de tipos de plantas en un hábitat dado.

1866 Ernst Haeckel propone la idea de «biotopo», o área para una gama determinada de plantas y animales.

DESPUÉS
1966 Leslie Holdridge defiende la idea de zonas de vida basadas en los efectos biológicos de las variaciones de temperatura y precipitaciones.

1973 El botánico ruso-alemán Heinrich Walter crea un sistema de biomas que considera las variaciones estacionales.

En diferentes partes del mundo hay patrones diversos de vida vegetal y animal, pero suele haber semejanzas a lo largo de áreas extensas, llamadas biomas, que son grandes regiones geográficas con comunidades de plantas y animales y un ecosistema propio. La noción de bioma fue popularizada primero por el botánico Frederic Clements y el zoólogo Victor Shelford en EE UU, en su obra clave *Bioecology* (1939), aunque su origen es anterior.

El concepto de bioma fue tomando forma a medida que se desarrollaban las ideas sobre sucesión de plantas y ecología de comunidades. Clements identificó «formaciones», o grandes comunidades de plantas, lo cual llevaría a su idea de las comuni-

Véase también: La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163 ▪ Comunidad clímax 172–173 ▪ Biogeografía 200–201

dades clímax en 1916. El mismo año, Clements aplicó el término «bioma» a las comunidades bióticas: todos los organismos que interactúan en un hábitat particular.

Pensadores afines

El zoólogo Victor Shelford trabajaba con la misma idea de Clements, y ambos se reunieron repetidamente a lo largo de los veinte años siguientes mientras trabajaban en sus respectivas investigaciones, a fin de hallar el modo de combinar los mundos de las plantas y los animales. Clements estudió biomas vegetales en Colorado con su esposa, la eminente botánica Edith Clements. Mientras tanto, Shelford compilaba *Naturalist's guide to the Americas* (1926), el primer resumen geográfico de la vida salvaje del continente americano, que pondría gran parte de los cimientos para hallazgos posteriores.

El estudio de las interacciones en comunidades biológicas dio un gran paso adelante cuando el botánico »

La **distribución** de las plantas la **determina** principalmente el **clima**.



En cada **región climática** se dan **plantas distintas**.



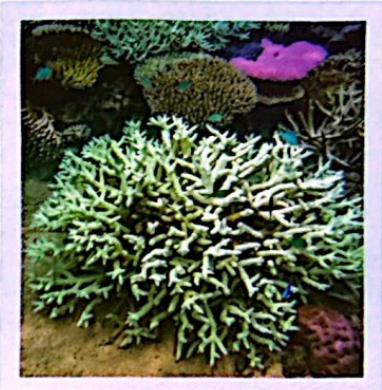
Los **tipos principales** de plantas en cada región **coinciden con patrones de temperatura y precipitaciones**.



Los tipos principales de plantas sirven para dividir el mundo en zonas naturales, o biomas, que reflejan variaciones climáticas.

La estepa de Mongolia pertenece al mismo bioma de pradera que las praderas de América del Norte. Pese a estar en continentes distintos, están vinculadas por su clima, sus animales y sus plantas.





Biomas de arrecife de coral amenazados

Los arrecifes de coral son hábitats tan espléndidos que suelen verse como las pluvisilvas tropicales del mar. Albergan un cuarto de todas las especies marinas, y dan sustento a unos quinientos millones de personas, pero hoy están al borde de la catástrofe. La mitad de los arrecifes se ha perdido en los últimos 30 años, y algunos expertos creen que se perderá el 90 % en las próximas tres décadas. Las principales amenazas para los arrecifes coralinos son la acidificación de los océanos y el calentamiento global. Al calentarse el agua, los corales expulsan las algas de las que dependen para alimentarse. Dejan de crecer, pierden el color y suelen morir por el llamado blanqueo del coral. Hay también amenazas locales como la sobrepesca (para el consumo humano y para acuarios). Para atrapar peces para acuarios, se echa cianuro de sodio en el agua, que los inmoviliza, pero también mata los corales. Además, la pesca con dinamita, destinada a obtener fácilmente grandes capturas para el consumo, es una práctica brutal que destruye los arrecifes.

británico Arthur Tansley introdujo el término «ecosistema», en 1935. El hecho de publicar Clements y Shelford los resultados de su colaboración en 1939 no fue un progreso repentino, sino la consolidación de ideas que llevaban tomando forma mucho tiempo.

La colaboración entre botánica y zoología fue crucial. Solo considerando la totalidad del mundo natural con sus interacciones dinámicas se podía obtener una imagen cabal, y Clements definió el bioma como «una unidad orgánica que comprende todas las especies de plantas y animales de un hábitat particular». Aún así, los biomas suelen definirse principalmente por su tipo de vegetación.

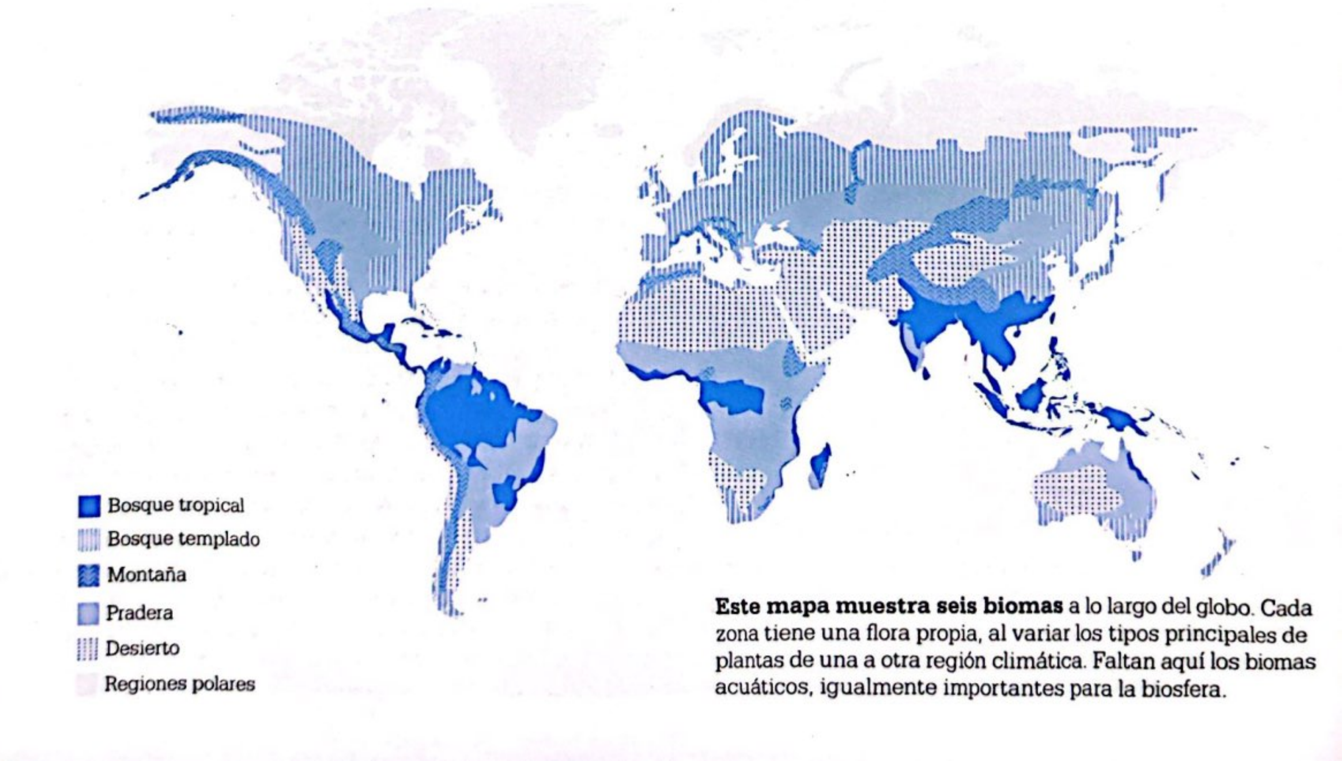
El rasgo más importante de los biomas es que vinculan comunidades de plantas de lugares alejados del mundo. Hay bosques tropicales en todos los continentes, pero la mayoría de las especies de árboles se encuentran en un solo continente. Así, la gama de árboles presente en la selva amazónica es completamente diferente de la de las selvas de Indonesia, pero ambas son identificables como bosque tropical, pues sus árboles tienen rasgos en común.

Desde la publicación de *Bioecology* ha habido incontables intentos de definir qué es un bioma, así como muchas maneras diferentes de clasificarlos. Los biomas son un modo sencillo de comprender los patrones de la vegetación global, pero, examinados de cerca, son una manera tosca de agrupar los ecosistemas. No hay un único sistema aceptado de clasificación, y la única división en la que todo el mundo parece estar de acuerdo es entre biomas terrestres y acuáticos. Muchos de los mismos biomas aparecen en la mayoría de los sistemas, caso del bioma polar, la tundra, la pluvisilva, la pradera y el desierto, pero no hay una definición única, y las variaciones son considerables.

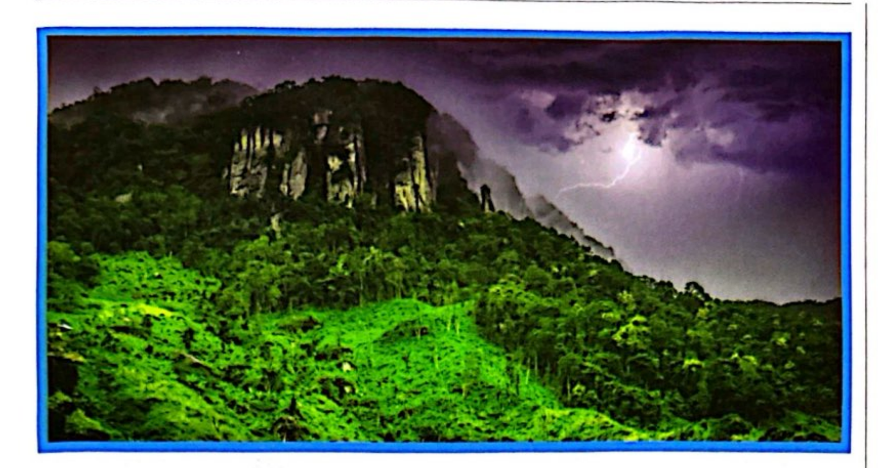
El factor clima

El factor común a todas las clasificaciones de biomas es el clima, aunque otros factores abióticos tengan también su papel. El clima determina la clase de crecimiento vegetal más adaptada a cada región, y las plantas que crecen de un modo determinado están restringidas a climas particulares. Las hojas de los árboles caducifolios son anchas, con una gran superficie para absorber luz, pero escasa resistencia a la sequedad o las heladas. Las agujas estrechas de las coníferas, en cambio, soportan temperaturas muy bajas. Los matorrales del desierto suelen tener hojas muy delgadas, o ninguna, para evitar resecarse. Los biogeógrafos reconocen el papel del clima cuando hablan de pluvisilvas «tropicales» y praderas «templadas». Muy pocas especies tienen requisitos climáticos idénticos. Incluso entre variedades de las mismas plantas, hay variacio-

Biomas terrestres del mundo



Este mapa muestra seis biomas a lo largo del globo. Cada zona tiene una flora propia, al variar los tipos principales de plantas de una a otra región climática. Faltan aquí los biomas acuáticos, igualmente importantes para la biosfera.



La pluvisilva tropical, uno de los biomas más antiguos, y el más cálido y húmedo, cubre el 7 % de la superficie terrestre. Contiene muchas más especies de plantas y animales que cualquier otro.

nes. Así, el arce azucarero del este de América del Norte es ligeramente más tolerante al frío invernal que su primo el arce plateado; sus áreas de distribución se solapan, pero el primero excede con mucho la frontera de Canadá hacia el norte, mientras que el segundo se da tan al sur como Texas. Los biomas solo ofrecen una imagen aproximada de la distribución de plantas y animales, y por eso los ecólogos están creando constantemente nuevos sistemas de clasificación.

Lluvia, calor y evolución

Uno de los sistemas de clasificación más reconocidos es el de «zonas de vida», creado por el botánico estadounidense Leslie Holdridge en 1947, y revisado en 1967. Este sistema se basa en el supuesto de que dos factores clave, la lluvia y el calor, determinan el tipo de vegetación de cada región. Holdridge representó 38 zonas de vida en una pirámide, cuyos tres lados representan tres ejes: precipitaciones, temperatura y evapotranspiración (dependiente este de los dos anteriores). Sobre estos ejes planteó hexágonos, para mostrar regiones que reflejaran también la humedad, la latitud y la altitud.

El ecólogo vegetal estadounidense Robert Whittaker ideó un gráfico más simple, con la temperatura media en un eje y las precipitaciones anuales en el otro. Con estas dos variables, dividió el gráfico en nueve biomas: desde la pluvisilva tropical (el más cálido y húmedo) hasta la tundra (el más frío y seco). Estos sistemas están sustentados por la idea de la evolución convergente, que explica cómo especies distintas desarrollan rasgos similares al adaptarse a medios similares. Los insectos, las aves, los murciélagos y los pterosaurios desarrollaron todos alas de forma independiente para ocupar el mismo espacio (el aire). Por tanto, se supone que los distintos biomas desarrollan formas de vida correspondientes en respuesta a condiciones ambientales semejantes. En las últimas décadas, sin embargo, se ha observado que las especies pueden evolucionar de forma diferente en el mismo bioma, y que pueden desarrollarse biomas estables distintos en un clima idéntico. Aunque clave para comprender la vida, el concepto de bioma sigue resultando complejo y escurridizo. ■

Ecozonas

Los biomas sirven para identificar las formas similares que adopta la vida en respuesta a condiciones regionales particulares, como el clima, el suelo y la topografía. Pero existen otros métodos para dividir el mundo con criterios ecológicos. En 1973, el biólogo húngaro Miklos Udvardy creó el concepto de los reinos biogeográficos, un sistema posteriormente desarrollado en un plan del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, o World Wildlife Fund). Más adelante se llamó ecozonas a estos reinos, que dividen el planeta entero en función de la historia evolutiva de sus plantas y animales. La deriva continental determinó que las especies evolucionaran de forma distinta en diferentes partes del mundo. Las ecozonas se basan, por lo tanto, en identificar esta diversificación. Australasia, por ejemplo, constituye una única ecozona, porque los marsupiales evolucionaron allí aislados de los mamíferos del resto del mundo.



El equidna de hocico corto es uno de los mamíferos nativos más comunes en la ecozona de Australasia. Vive en hábitats diversos, desde el desierto hasta la pluvisilva.



NO VALORAMOS LOS SERVICIOS DE LA NATURALEZA PORQUE NO LOS PAGAMOS

UNA PERSPECTIVA HOLÍSTICA DE LA TIERRA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Eugene Odum (1913–2002)

ANTES
1905 En *Research methods in ecology*, Frederic Clements, botánico estadounidense, escribe sobre comunidades de plantas y cómo cambian con el tiempo.

1935 El botánico británico Arthur Tansley propone el término «ecosistema» para una comunidad de plantas, animales, minerales del suelo, agua y aire.

DESPUÉS
1954 El estudio de Eugene y Howard Odum sobre el atolón Eniwetok (Islas Marshall) aplica los principios de la ecología holística.

1974 El ambientalista británico James Lovelock y la bióloga estadounidense Lynn Margulis publican la hipótesis Gaia, en la que la Tierra es un sistema autorregulado que mantiene las condiciones necesarias para la vida en el planeta.



Las marismas salobres, como estas en la costa próxima a Porthmadog (Gales), son un ecosistema propio donde el agua de mar y sus nutrientes ofrecen un hábitat único para la vida.

Eugene Odum, ecólogo estadounidense, no fue el primer científico que escribió sobre ecología, pero en la década de 1950 defendió que merecía ser una disciplina por sí misma. Hasta entonces se tenía por una subdivisión relativamente insignificante de las ciencias biológicas, el pariente pobre de la biología, la zoología y la botánica. Odum creía, sin embargo, que estudiar especies de plantas y animales de forma aislada no conduciría nunca a un conocimiento pleno del mundo vivo, y que era más importante estudiar el lugar y el papel que ejercen las especies en su comunidad, en vez de meramente averiguar más acerca de qué son. El nuevo enfoque del tema de Odum –planteado por prime-

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ Macroecología 185 ▪ La coexistencia pacífica de la humanidad y la naturaleza 297 ▪ El movimiento verde 308–309

ra vez en su libro de 1953 *Ecología*– revolucionó el propósito y la influencia de los estudios ecológicos.

La «nueva ecología»

La perspectiva holística de la Tierra implica estudiar los sistemas de organismos como un todo. Como explicaba Odum, un organismo, o cualquier grupo de ellos por sí solo, no se puede comprender sin estudiar el ecosistema en que vive. El enfoque holístico examina todas las funciones que ejerce cada miembro de un ecosistema y cómo interactúa ese sistema con otros. El clima, la geología, el aporte de agua y minerales y la actividad humana afectan todos a –y son afectados por– multitud de comunidades vivas.

Odum escribía en las décadas de 1950 y 1960, cuando estaba creciendo la conciencia de la destrucción ambiental causada por la humanidad. El papel de la gente era una parte crucial de la «ecología de sistemas», como llamaba a su idea. Odum quería que los seres humanos fueran aliados comprensivos del mundo natural, colaboradores en vez de manipuladores, y su noción de una ecología que lo abarcara todo hizo mucho por inspirar el primer Día de la Tierra, celebrado en 1970.

El concepto holístico de la nueva ecología de Odum trata la Tierra como un todo, reuniendo la física, la química, la botánica, la zoología, la geología y la meteorología. Los supuestos fundamentales de la ecología son que el ecosistema es la unidad básica de la naturaleza, que la diversidad biológica favorece la supervivencia de los ecosistemas y que el todo es mayor que la suma de las partes. Los sistemas del mundo natural –sean grupos de células en el cuerpo de un animal, el animal entero o el ecosistema donde el animal vive– son capaces de autorregularse para lograr la estabilidad.




[…] la ecología ha sido mal presentada, y se ha desmembrado en demasiadas subdivisiones antagónicas.
Eugene Odum




Estudios integrados

Un estudio holístico de un ecosistema lacustre supondría considerar todos los aportes al lago y sus márgenes, así como todo lo que el lago aporta, incluidos la energía, el agua, los minerales y los nutrientes. También se tiene en cuenta cualquier aporte humano. El estudio examinaría el papel tanto de los organismos productores, como plantas y algas, como de consumidores tales como herbívoros y carnívoros. El enfoque holístico estudia también los cambios a lo largo del tiempo, en tanto que los desarrollos que benefician a algunos organismos a corto plazo pueden dañar la diversidad en el futuro. Así, las truchas prosperan en aguas cálidas y alcalinas, pero si el cambio ecológico intensifica en exceso dichos rasgos, ya no son capaces de criar.

El legado del enfoque holístico de Odum es una percepción más detallada de lo que ocurre en un ecosistema que una mera serie de estudios sobre especies individuales. ▪

Día de la Tierra

Tras presenciar un espantoso vertido de crudo en Santa Bárbara (California), en 1969, el senador estadounidense Gaylord Nelson decidió atender a la preocupación creciente por la contaminación en un fórum educativo nacional sobre el medio ambiente. No imaginaba las dimensiones del movimiento que iba a inspirar. El 22 de abril de 1970, unos veinte millones de estadounidenses participaron en el primer Día de la Tierra, en marchas y conferencias por todo el país. El efecto de las protestas fue tal que pronto se aprobaron una enmienda de la Ley de Aire Limpio y las nuevas leyes de Agua Limpia y Especies en Peligro de Extinción, además de crearse la Agencia de Protección Ambiental. El Día de la Tierra se convirtió en fenómeno global: en 1990 participaron unos doscientos millones de personas en 141 países, dando impulso a la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992. Se celebra cada mes de abril, con un tema diferente cada año, que en 2019 fue la salvación de las especies en peligro de extinción.



El primer Día de la Tierra, el 22 de abril de 1970, movilizó multitudes por todo EE UU, como esta en Filadelfia, para protestar contra la contaminación y el uso de pesticidas.



LA TECTONICA DE PLACAS NO ES TODO CAOS Y DESTRUCCION

CONTINENTES MÓVILES Y EVOLUCIÓN

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Alfred Wegener (1880–1930)

ANTES
1596 Abraham Ortelius, estudioso neerlandés, es uno de varios geógrafos que observan que ambas orillas del Atlántico parecen encajar.

DESPUÉS
1929 El geólogo británico Arthur Holmes afirma que la convección del manto terrestre impulsa la deriva continental.

1943 George Gaylord Simpson rechaza las pruebas fósiles de la deriva continental y habla de «continentes estables».

1962 Harry Hess, geólogo estadounidense, explica cómo se expande el lecho marino por el magma que surge desde abajo.

2015 Según un grupo de científicos australianos, los periodos de evolución rápida en los océanos se debieron a colisiones de placas tectónicas.

La corteza terrestre se mueve constantemente, muy despacio, y lleva haciéndolo más de 3000 millones de años. La litosfera (la corteza y el manto superior terrestres) se divide en siete grandes secciones y muchas otras de menor tamaño, llamadas placas tectónicas. Donde estas se encuentran, el tipo de movimiento determina la naturaleza de los límites. Si empujan una contra otra, se forma relieve nuevo. Si se alejan una de otra, se forma corteza nueva en el lecho oceánico.

La primera pista de que los continentes no siempre ocuparon su lugar actual se conoció a finales del siglo XVI. Los exploradores europeos que iban a América veían en sus mapas nuevos que las respectivas costas del Atlántico eran como un espejo la una de la otra. Más adelante, los geólogos encontraron grandes semejanzas estructurales y geológicas entre el relieve de la orogenia caledoniana del norte de Europa y los Apalaches de América del Norte.

Fósiles similares

Hay varios ejemplos de hallazgos fósiles en continentes distintos que solo se explican por el movimiento continental, dado que los animales o plantas en cuestión no habrían sido capaces de cruzar un océano. Entre ellos figura *Cynognathus crateronotus*, reptil próximo a los mamíferos que vivió hace más de 200 millones de años en el sur de África y el este de América del Sur. El género de plantas leñosas *Glossopteris* crecía en América del Sur, el sur de África, Australia, India y la Antártida, y en ningún otro lugar, hace unos trescientos millones de años.

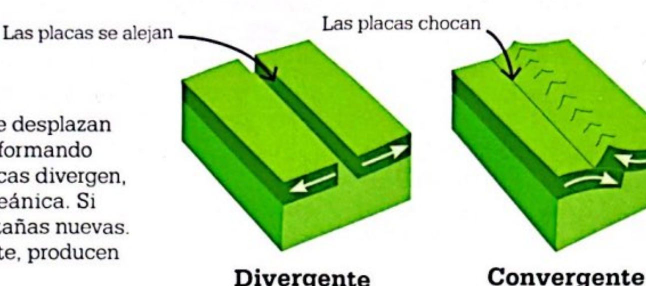


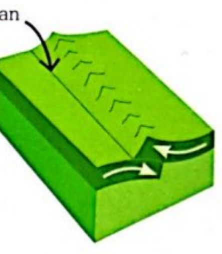
Este cráneo fósil del reptil extinto *Cynognathus crateronotus* se encontró en el sur de África, y los mismos fósiles están en América del Sur, prueba de que ambos continentes fueron uno.

Para el geofísico alemán Alfred Wegener, tales patrones fósiles indicaban que esos continentes estuvieron unidos en el pasado. En 1915 publicó su teoría de que los continentes habían formado una única masa original de tierra emergida, Pangea, que se fue fragmentando y dispersando.

Véase también: Biogeografía de islas 144–149 ▪ La distribución de las especies en el tiempo y el espacio 162–163 ▪ Macroecología 185 ▪ Metapoblaciones 186–187 ▪ Biogeografía 200–201

Tres tipos de límites de placas







Las placas tectónicas se desplazan de tres formas diferentes, formando límites distintos. Si las placas divergen, se forma nueva corteza oceánica. Si convergen, se forman montañas nuevas. Si se desplazan lateralmente, producen una falla transformante.

La teoría de Wegener no fue bien recibida. En 1943, George Gaylord Simpson, uno de los paleontólogos más influyentes de EE UU, la rechazó, argumentando que el registro fósil se podía explicar por continentes vinculados y desvinculados por inundaciones periódicas.

Evidencia y evolución

Con todo, las pruebas en favor de la tectónica de placas se iban acumulando. Una serie de descubrimientos acreditaron que el lecho marino se expande y que constantemente se crea nueva corteza oceánica. Hoy se comprende que el movimiento de las placas tectónicas es impulsado por las corrientes de convección que transportan calor del interior del planeta hacia la superficie.

Aceptada la teoría de Wegener, el registro fósil tenía mucho más sentido. La deriva continental tuvo una gran influencia en la evolución de las especies. Al dividirse un continente, las dos poblaciones separadas de una especie pueden evolucionar en una dirección completamente diferente. Por otra parte, al chocar dos continentes o formarse un puente de tierra entre ellos, se mezclan y compiten especies distintas, lo cual puede resultar en la extinción de algunas. ■



Las fuerzas que desplazan los continentes son las mismas que hacen surgir cordilleras por plegamiento.
Alfred Wegener





Los marsupiales se identifican con Australia, pero evolucionaron en América, donde aún viven también.

Marsupiales en América y Australia

Los marsupiales son mamíferos no placentarios cuyas crías completan la gestación mamando, por lo general en la bolsa, o marsupio, de la madre. Presentes hoy solo en América (sobre todo del Sur y Central) y Australia, se cree que evolucionaron en América del Norte hace unos cien millones de años, se difundieron a América del Sur y se diversificaron en múltiples especies. Varios grupos alcanzaron después lo que hoy es la Antártida y el sur de Australia. Se cree que fueron avanzando por una franja de vegetación entre las tres áreas, todas parte del supercontinente meridional Gondwana.

Hace 55 millones de años, los continentes se habían separado, y las especies de marsupiales evolucionaron en direcciones distintas. Los únicos fósiles de marsupial conocidos de la Antártida, en rocas de hace 40 millones de años de la isla Seymour, se parecen a los marsupiales sudamericanos de la época, pero no a los de Australia.

LA VIDA CAMBIA LA TIERRA PARA SUS PROPIOS FINES

LA HIPÓTESIS GAIA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
James Lovelock (n. 1919)

ANTES
1935 Arthur Tansley llama «ecosistema» a una comunidad interdependiente de componentes biológicos y no biológicos.

1953 En *Ecología*, el ecólogo estadounidense Eugene Odum describe el planeta Tierra como una serie de ecosistemas interconectados.

DESPUÉS
1985 Primera conferencia sobre la hipótesis Gaia en EE UU, titulada «¿Es la Tierra un organismo vivo?».

2004 James Lovelock declara su apoyo a la energía nuclear frente a las energías renovables.

En 1979, la obra del científico británico James Lovelock *Gaia, una nueva visión de la vida sobre la Tierra* presentó la hipótesis Gaia al público general. En esencia, lo que aquí Lovelock afirmaba es que la Tierra es un único sistema autorregulado en el que los elementos vivos y no vivos se combinan para favorecer la vida. El libro fue un éxito instantáneo, y atrapó la imaginación del naciente movimiento ecologista, al ofrecer un enfoque novedoso del ambientalismo.

Lo que proponía Lovelock no carecía de precedentes: en la década de 1920, el científico ruso Vladímir Vernadski había desarrollado la idea de la biosfera, la zona de la Tierra que contiene todos los organismos vivos, y había propuesto que esta podía considerarse como una entidad única

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ Estado evolutivamente estable 154–155 ▪ La biosfera 204–205 ▪ Una perspectiva holística de la Tierra 210–211



La evolución es un baile muy agarrado, con la vida y el medio material como danzantes. De la danza surge la entidad Gaia.



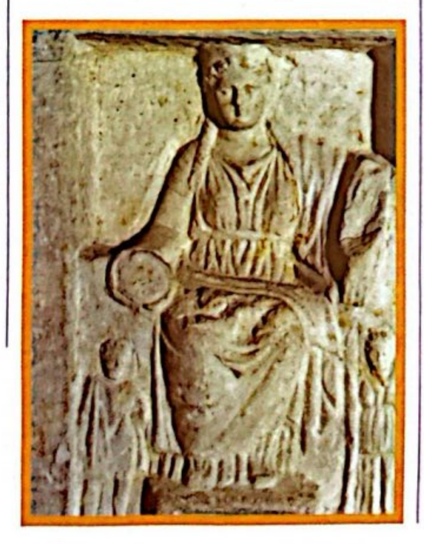


en la que interactúan elementos orgánicos e inorgánicos. El botánico británico Arthur Tansley llevó la idea más allá en la década de 1930, con el concepto de un ecosistema que se autorregula para tender al equilibrio.

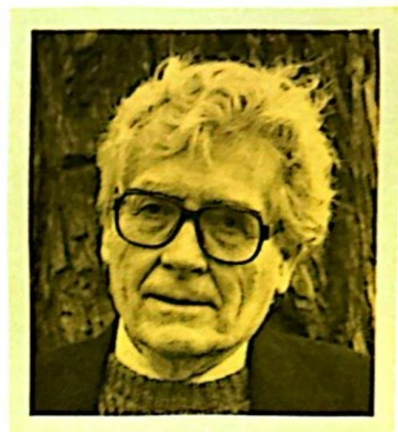
La teoría de Tansley es central en la hipótesis de Lovelock, en la que todos los organismos vivos y su medio forman un superecosistema complejo que regula y equilibra las condiciones que sustentan la vida en la Tierra. La idea se le ocurrió a Lovelock a finales de la década de 1960, pero fue a raíz de las conversaciones que mantuvo sobre la misma con la microbióloga estadounidense Lynn Margulis que la hipótesis comenzó a tomar forma. La presentaron conjuntamente en un trabajo de 1974, con un nombre sugerido por el escritor William Golding: Gaia, la diosa de la Tierra de los antiguos griegos. Lovelock y Margulis describían la Tierra como un ente vivo, compuesto por: la biosfera, los organismos vivos; la pedosfera, la capa superficial de la Tierra; la hidrosfera, el agua líquida sobre la superficie terrestre; y la atmósfera, los gases que rodean la Tierra. Estas esferas y sus complejas interacciones mantienen la Tierra en «homeostasis», un concepto tomado de la fisiología para referirse a las condiciones internas estables de temperatura y composición química, entre otras, que permiten el funcionamiento óptimo de un organismo. Las controlan mecanismos autorreguladores que reaccionan ante los cambios en dichas condiciones. El empleo del término homeostasis venía a reforzar, por implicación, que la Tierra, o Gaia, es un ente vivo.

Mantener el equilibrio

Las resonancias místicas de la hipótesis Gaia casaban bien con el pensamiento *new age* de la época, y eso contribuyó a popularizarla, pero también despertó la reacción negativa de los círculos académicos. No obstante, tras la metáfora de la «diosa» de la Tierra, había una hipótesis de »



Relieve en piedra de Gaia, diosa griega de la Tierra. El nombre no científico que escogió Lovelock para su hipótesis dificultó al principio su aceptación por muchos científicos.



James Lovelock

Inspirado por autores como Julio Verne y H. G. Wells, a James Lovelock, nacido en 1919, le fascinaron la ciencia y los inventos desde una edad temprana. Se licenció en química por la Universidad de Manchester en 1941. Fue objetor de conciencia durante la Segunda Guerra Mundial, y trabajó para el Instituto Nacional de Investigación Médica en Londres. Obtuvo el doctorado en medicina en 1948, y pasó un tiempo en EE UU gracias a una beca de investigación Rockefeller. Tras regresar a Gran Bretaña en 1955, se dedicó a inventar y creó el detector de captura de electrones, que detecta trazas atómicas en muestras de gas. En las décadas de 1960 y 1970, Lovelock fue profesor visitante en Houston (Texas) y Reading (Inglaterra), y en esta época desarrolló la hipótesis Gaia. En 2003 fue nombrado Compañero de Honor por Isabel II.

Obras principales

1988 *Las edades de Gaia.*
1991 *Gaia: the practical science of planetary medicine.*
2009 *The vanishing face of Gaia: a final warning.*

«Daisyworld»

En un principio los científicos criticaron la hipótesis Gaia por su supuesta insinuación de que los ecosistemas de la biosfera influyen colectivamente en el medio terrestre. Para respaldar la plausibilidad de la teoría, en 1983, James Lovelock y su colega Andrew Watson crearon un modelo explicativo sencillo, «Daisyworld»: un planeta estéril en órbita en torno a un sol. Al aumentar la intensidad de los rayos de este, empiezan a crecer margaritas *(daisies)* negras, que absorben calor y calientan la superficie hasta el punto en que pueden crecer margaritas blancas. Estas reflejan la energía solar y enfrían el suelo. Los dos tipos de margaritas alcanzan un punto de equilibrio en el que regulan la temperatura del planeta. Al aumentar el calor del sol todavía más, las margaritas blancas, capaces de reflejar la luz y mantenerse frescas, sustituyen a las negras. Finalmente, el calor es tal que ni siquiera las margaritas blancas son capaces de sobrevivir.

base científica: que los organismos y su entorno físico –incluidos los ciclos del oxígeno, el carbono, el nitrógeno y el azufre– forman un sistema dinámico que estabiliza el medio.

Según Lovelock, Gaia está controlada por la actividad de «bucles de retroalimentación», mecanismos que compensan las perturbaciones del sistema y lo devuelven al equilibrio. Para funcionar bien, la Tierra depende de un equilibrio particular de variables como el agua, la temperatura, el oxígeno, la acidez y la salinidad en su medio. Cuando estas son constantes, la Tierra se encuentra en un estado estable de homeostasis, pero, cuando el equilibrio se vea perturbado, el planeta favorecerá a los organismos que restaurarán el equilibrio, y será hostil a aquellos que refuerzan la perturbación. Los componentes orgánicos del sistema de la Tierra no se limitan a reaccionar ante los cambios del medio, sino que los controlan y regulan.



En la hipótesis Gaia, la Tierra, el único planeta con vida conocido, es en sí mismo un superorganismo donde mar, tierra y atmósfera trabajan juntos para mantener las condiciones adecuadas.

Estos mecanismos de retroalimentación operan en una compleja red global de ciclos naturales interconectados con el fin de mantener las condiciones óptimas para los organismos que contienen. Resisten los cambios, pero solo hasta cierto punto. Una perturbación lo bastante grave puede llevar al sistema a un punto de inflexión más allá del cual, alterado el equilibrio de sus componentes, se asentará en un estado de equilibrio muy diferente.

Dicho punto de inflexión se produjo, afirmaba Lovelock, hace unos 2500 millones de años, al final del eón Arcaico, cuando apareció por primera vez el oxígeno en la Tierra, que era entonces un lugar caliente y ácido donde la única vida que prosperaba eran las bacterias productoras de metano. Entonces evolucionaron bacterias capaces de realizar la fotosíntesis, y esto iba a crear una



Si hubiera una guerra nuclear y aniquilara a la humanidad, la Tierra emitiría un suspiro de alivio.
James Lovelock



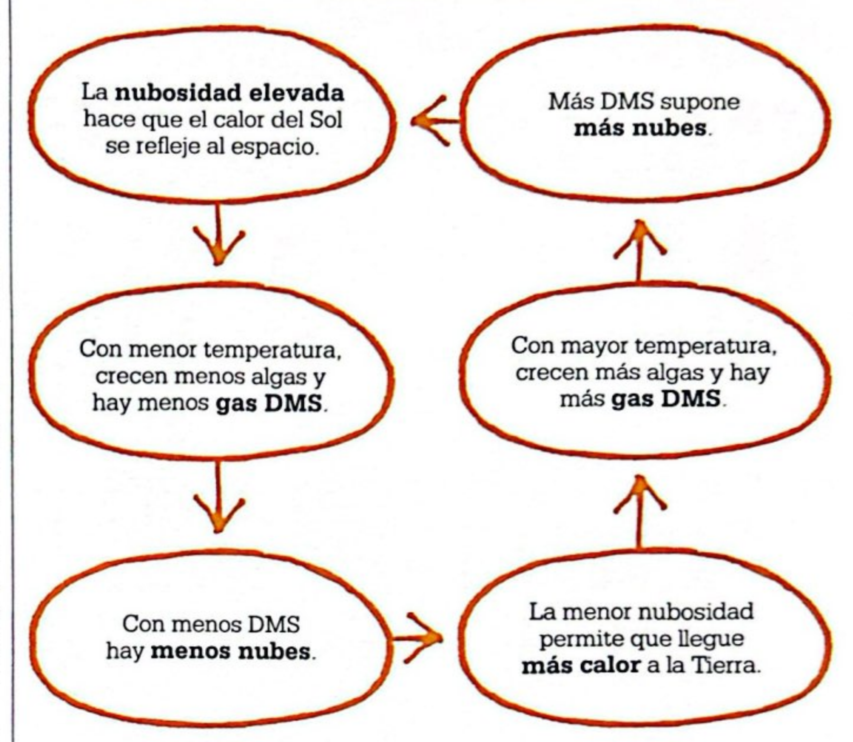
atmósfera conducente a formas de vida más complejas. Con el tiempo, se fueron asentando las condiciones de equilibrio que existen en la Tierra hoy.

Salvar el planeta

Lovelock continuó desarrollando la idea, y el mundo científico fue aceptando de manera gradual la hipótesis Gaia. En la década de 1980, una serie de «conferencias Gaia» atrajo a científicos de disciplinas muy diversas, dispuestos a explorar los mecanismos implicados en la regulación del medio terrestre para lograr la homeostasis. Más adelante, se dedicó mayor atención a las implicaciones de la hipótesis ante el fenómeno del cambio climático. La actividad humana había perturbado el sistema de Gaia, pero la cuestión era si sus mecanismos regulatorios podrían soportar la presión continuada o si la Tierra se enfrentaba a otro punto de inflexión irreversible.

Los ecologistas, entre los primeros en asumir Gaia como algo propio, reaccionaron con horror ante la noción de que la especie humana pueda precipitar un cambio catastrófico en el equilibrio de la Tierra. «¡Salvad el planeta!» fue el grito de guerra de los activistas verdes, pero el lema se aviene mal con lo fundamental de la hipótesis. Aunque la destrucción de los hábitats naturales, el uso excesivo de combustibles fósiles, la pérdida de biodiversidad y otras amenazas de origen humano tengan consecuencias graves para muchas especies –la propia humanidad incluida–, el planeta, según la hipótesis, sobrevivirá y hallará un nuevo equilibrio. ■

El bucle de retroalimentación de las algas



En la teoría Gaia, los bucles de retroalimentación mantienen el equilibrio en la Tierra. Un ejemplo es el efecto sobre el clima de las algas marinas llamadas cocolitóforos. Al morir, liberan un gas, el dimetilsulfuro (DMS), que contribuye a la formación de nubes.



Las centrales nucleares producen abundante energía «limpia», pero también desechos tóxicos. James Lovelock cree que la Tierra puede absorber y superar sus efectos radiactivos.

HACE 65 MILLONES DE AÑOS ALGO MATO LA MITAD DE LA VIDA EN LA TIERRA

EXTINCIONES MASIVAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Luis Alvarez (1911–1988)

ANTES
1953 Allan O. Kelly y Frank Dachille, geólogos estadounidenses, proponen en *Target: Earth* que un impacto de meteorito pudo ser la causa de la extinción de los dinosaurios.

DESPUÉS
1991 Se señala el cráter de Chicxulub, en el norte de la península de Yucatán (México), como el lugar donde se produjo el impacto de un gran meteorito al final del Cretácico.

2010 Un comité internacional de científicos da por demostrado que el impacto de Chicxulub causó la extinción masiva del Cretácico-Paleógeno, hace unos 65 millones de años.



El asteroide que alcanzó la Tierra al final del periodo Cretácico viajaba a 64 000 km/h. Su potencia fue mil millones de veces superior a la de la bomba atómica de Hiroshima.

Ha habido cinco periodos de la historia de la Tierra en los que un número anormalmente alto de organismos multicelulares desaparecieron en un espacio de tiempo relativamente corto. Estas extinciones masivas se definen por la pérdida de animales y plantas multicelulares debido a que sus fósiles son más fáciles de detectar que los de los organismos unicelulares.

La tasa de extinción general, o de fondo, es de entre una y cinco especies al año. El registro fósil indica, por ejemplo, la extinción de entre dos y cinco familias de animales marinos cada millón de años. Estos datos se superan con creces durante las extinciones masivas, que siempre marcan el límite entre dos periodos geológicos. Los científicos no comprenden todos los factores en juego en estos

Extinciones masivas desde hace 485 m.a. hasta el presente

ORDOVÍCICO 485–444 m.a. | SILÚRICO 444–419 m.a. | DEVÓNICO 419–359 m.a. | CARBONÍFERO 359–299 m.a. | PÉRMICO 299–252 m.a. | TRIÁSICO 252–201 m.a. | JURÁSICO 201–145 m.a. | CRETÁCICO (K) 145–66 m.a. | PALEÓGENO 66–23 m.a. | NEÓGENO 23–3 m.a.

HOLOCENO (O ANTROPOCENO) HACE 100 000 AÑOS–PRESENTE

Ordovícico
El enfriamiento global causa la extinción del 85 % de la vida marina.

Devónico tardío
Un descenso brusco del nivel del mar es una de las posibles causas de la pérdida del 70–80 % de las especies animales.

Pérmico
Se extingue el 96 % de las especies marinas por la gran actividad volcánica.

Triásico
El cambio climático o el impacto de un asteroide, causas posibles de la extinción de un 75 % de las especies.

Cretácico
Un asteroide y el vulcanismo causan la extinción del 80 % de los animales, entre ellos la mayoría de los dinosaurios.

Véase también: Antiguas glaciaciones 198–199 ▪ Continentes móviles y evolución 212–213 ▪ La hipótesis Gaia 214–217 ▪ Acidificación de los océanos 281



La historia geológica está llena de comienzos y finales de especies, sus primeros y últimos días.
Hugh Miller
Geólogo escocés



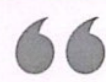
sucesos, aunque están de acuerdo en algunos de ellos. La mayor actividad volcánica, los cambios en la composición de la atmósfera y los océanos, el cambio climático, la subida y bajada del nivel del mar, el movimiento tectónico de los continentes y los impactos de meteoritos son todos causas probables. Algunos científicos creen que se ha iniciado una sexta extinción masiva, en esta ocasión como resultado de la actividad humana.

El fin de los dinosaurios

La extinción masiva mejor comprendida por los científicos es también la más reciente, de hace unos 66 millones de años. Los geólogos la conocen como la extinción masiva del límite K/Pg, por coincidir con el fin del periodo Cretácico y el inicio del Paleógeno. Aunque se propuso una causa extraterrestre por primera vez en la década de 1950, no fue una idea que se tomara en serio hasta que se produjeron dos descubrimientos, uno en Europa y otro en América del Norte.

En 1980, un equipo de científicos que trabajaba en Italia, entre ellos el físico Luis Alvarez, y su hijo el geólogo Walter Alvarez, descubrieron una capa de arcilla entre los depósitos del Cretácico y el Paleógeno. El análisis de la arcilla reveló la presencia de iridio, raro en la Tierra, pero común en los asteroides. El descubrimiento condujo a la llamada hipótesis Alvarez, que proponía que la extinción al final del Cretácico fue causada por el impacto catastrófico de un gran asteroide. El lugar del impacto era un misterio, pero once años después se descubrió un cráter masivo de 170 km de diámetro en la península de Yucatán (México), cuya fecha coincidía con la de la extinción.

El consenso científico es que un cometa o un asteroide masivo golpeó la Tierra, produciendo un estallido de radiación y un megatsunami destructivo de más de 100 m de altura. La radiación habría matado a los animales de la zona, y el megatsunami habría asolado las regiones costeras del golfo de México. La mayor parte del daño, sin embargo habría sido más gradual. Una vasta nube de hollín y polvo habría llenado la atmósfera, bloqueando la luz solar durante años. Las plantas murieron al no poder realizar la fotosíntesis, »



Tenemos pruebas físicas y químicas muy sólidas de un gran impacto [...], la extinción coincide con el impacto con una precisión de un centímetro o menos.
Walter Alvarez





Luis Alvarez

Considerado uno de los mayores físicos del siglo xx, Alvarez nació en San Francisco en 1911. En 1936 se licenció en la Universidad de Chicago, y trabajó en el laboratorio de radiación de la Universidad de California en Berkeley. Allí participó en el desarrollo de reactores nucleares y, durante la Segunda Guerra Mundial, de armas nucleares. Fue testigo del bombardeo de Hiroshima, y trabajó en la construcción de una bomba de plutonio. Acabada la guerra, Alvarez desarrolló la cámara de burbujas de hidrógeno líquido, usada para descubrir nuevas partículas subatómicas, lo cual le valió recibir el Nobel de Física en 1968. Aportó los cálculos para respaldar la hipótesis de la extinción masiva causada por un asteroide. Murió en 1988.

Obras principales

1980 «Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction», *Science*.
1985 «The hydrogen bubble chamber and the strange resonances».
1987 *Alvarez: adventures of a physicist*.



Muchos dinosaurios voladores sobrevivieron a la extinción K/Pg al final del Cretácico, pero murieron todos los pterosaurios, después de 162 millones de años en la Tierra.

como las algas de los arrecifes de coral, haciendo colapsar las cadenas tróficas a escala global. El impacto habría liberado también ácido sulfúrico a la atmósfera, lo cual causó una lluvia ácida que acidificó los océanos y aniquiló la vida marina. Hacia la misma época, una gran actividad volcánica inundó de lava 500 000 km² del sur de India, formando la meseta del Decán, y alterando aún más el clima y la atmósfera.

El evento K/Pg se conoce sobre todo por la extinción masiva de los dinosaurios no voladores. También mató a casi todos los animales de cuatro patas (tetrápodos) que pesaban más de 25 kg. Una excepción fueron los cocodrilos, que pudieron sobrevivir por ser ectotermos (de sangre fría) y capaces de sobrevivir durante mucho tiempo sin alimento. Los dinosaurios eran endotermos (de sangre caliente), y mantener su metabolismo rápido exigía alimento regular. Muchas especies de plantas murieron al no poder realizar la fotosíntesis, lo cual dejó escasa vegetación a los dinosaurios herbívoros, mientras que las especies predatorias morían por falta de presas. Por contraste, los hongos, que no dependen de la fotosíntesis, proliferaron. En los océanos murió el fitoplancton, fuente de alimento vital también dependiente de la fotosíntesis. Los animales que se alimentaban de él se extinguieron, entre ellos cefalópodos como los belemnites y amonites, y reptiles marinos como los mosasaurios y sauropterigios.

Aniquilación marina

La extinción masiva más antigua, y la segunda más catastrófica, se produjo por un enfriamiento drástico del planeta hacia el final del periodo Ordovícico, hace 444 millones de años. En esa época, la mayoría de los seres vivos vivían en los océanos. A medida que el supercontinente Gondwana se dirigía lentamente al Polo Sur, se formó un casquete polar gigante que redujo las temperaturas globales. Gran parte del agua del planeta quedó atrapada en forma de hielo, haciendo descender el nivel del mar y reduciendo el área de la superficie terrestre cubierta por los océanos.

Como resultado, los organismos marinos que vivían en las aguas poco profundas de las plataformas continentales sufrieron tasas de extinción especialmente elevadas. En al menos dos picos de mortandad de especies, separados por cientos de miles de años, se extinguió casi el 85 % de las especies marinas, entre ellas braquiópodos, briozoos, trilobites, graptolitos y equinodermos.

Extinción lenta

Al final del periodo Devónico, hace unos 359 millones de años, las plan-



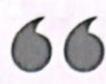
La actual extinción tiene una causa nueva: ni asteroide ni erupción volcánica, sino una sola especie débil.

Elizabeth Kolbert

Periodista estadounidense



tas e insectos habían colonizado los continentes, y prosperaban arrecifes orgánicos masivos en los océanos. Los continentes Euramérica y Gondwana estaban convergiendo en lo que sería Pangea, el último de los supercontinentes. En este periodo, hubo varias extinciones –quizá hasta siete– en una escala temporal más larga que la de cualquier otra extinción masiva, posiblemente hasta 25 millones de años. Las extinciones pudieron deberse a muchas causas, como la reducción del oxígeno en el océano, el descenso del nivel del mar, cambios en la atmósfera, el acaparamiento del agua por la difusión de las plantas o impactos de asteroides. La mayoría de los seres vivos vivía en los océanos, y las aguas poco profundas fueron las más afectadas, extinguiéndose muchos organismos constructores de arrecifes, braquiópodos, trilobites y la última de las especies de graptolitos. Murió un 75 % aproximado de las especies marinas, y pasarían unos cien millones de años antes de que los corales pudieran volver a establecerse a gran escala.



Las tasas futuras de extinción proyectadas son 10 000 veces la tasa de fondo de la historia geológica terrestre.
Ron Wagler
Académico estadounidense



La Gran Mortandad

La más dramática de las extinciones masivas se produjo al final del Pérmico, hace 252 millones de años. Llamada la Gran Mortandad, produjo la pérdida del 96 % de las especies marinas y del 70 % de los vertebrados terrestres. Los insectos sufrieron la única extinción masiva de su historia, y los últimos trilobites, en declive desde hacía millones de años, desaparecieron del registro fósil.

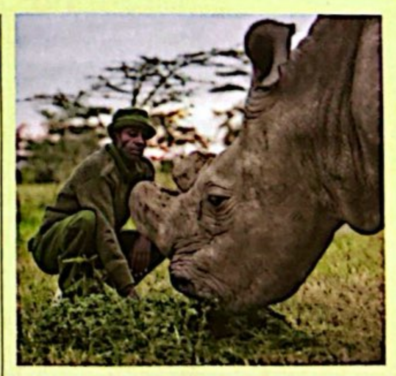
Entre las causas posibles de esta extinción masiva están el impacto de un asteroide y la reducción del oxígeno en los océanos. La extinción coincidió también con uno de los periodos de mayor actividad volcánica de la historia. Las erupciones, que duraron casi un millón de años, inundaron más de dos millones de kilómetros cuadrados de la antigua Siberia con lava basáltica. La acumulación de gases de efecto invernadero resultante habría transformado la atmósfera terrestre, con el resultado probable del calentamiento global y la extinción de especies.

Pérdidas graduales

Toda la vida actual desciende de una pequeña minoría de especies supervivientes al inicio del Triásico. Durante los 18 millones de años finales de ese periodo, que acabó hace unos 201 millones de años, al menos la mitad de las especies animales que se sabe vivían entonces quedaron aniquiladas en dos o tres fases de extinción. Se han citado como causas el cambio climático causado por nuevas erupciones basálticas y el impacto de un asteroide. En los mares se extinguieron muchos reptiles, cefalópodos, moluscos y organismos constructores de arrecifes. En tierra desapareció la mayoría de los arcosaurios y muchos grandes anfibios. La extinción de los arcosaurios, en particular, dejó vacantes nichos ecológicos que llenaron los dinosaurios. ■

La sexta extinción

Algunos ecólogos estiman que la tasa actual de extinción de animales y plantas es de entre cien y mil veces la tasa de fondo natural, y que se debe en su mayor parte al aumento, de manera directa o indirecta, de la actividad humana. Esto es tomado como prueba de que el mundo se encuentra ya en plena extinción del Holoceno, la actual época geológica. Desde el inicio de la revolución industrial en el siglo XVIII se han perdido muchas especies de animales y plantas, debido al cambio de hábitat, el cambio climático, la sobrepesca, la caza excesiva, la acidificación de los océanos, la contaminación del aire y la introducción de animales que desbaratan las cadenas tróficas. E. O. Wilson, ecólogo estadounidense, llamado «padre de la biodiversidad», opina que, al ritmo actual, en 2100 se habrá extinguido la mitad de las formas de vida superiores. Stuart Pimm, biólogo británico-estadounidense y experto en extinciones modernas, es más cauto, y cree que estamos en el umbral de un evento como ese, y también a tiempo para impedirlo.



Sudán, el último macho de rinoceronte blanco del Norte, murió en 2018 (quedan dos hembras). La caza ha llevado a la especie al borde de la extinción.



QUEMAR TODAS LAS RESERVAS DE COMBUSTIBLE DESBOCARA EL EFECTO INVERNADERO

BUCLES DE RETROALIMENTACIÓN AMBIENTAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
James Hansen (n. 1941)

ANTES
1875 En su obra *Climate and change*, el científico escocés James Croll describe el efecto de calentamiento por retroalimentación al fundirse el hielo.

1965 El biólogo canadiense Charles Krebs descubre el «efecto valla», al dispararse y luego desplomarse las poblaciones de topillos protegidos de los zorros por vallas.

1969 El científico planetario estadounidense Andrew Ingersoll describe el efecto invernadero desbocado que calentó Venus.

DESPUÉS
2018 Ecólogos en Alaska predicen que la emisión acelerada de metano de lagos antes helados aumentará el calentamiento global.

Bucles de retroalimentación negativos regulan los ecosistemas.

↓

Mitigan los **cambios**.

↓

Mantienen las **poblaciones** bajo **control**.

↓

Los bucles de retroalimentación negativos aportan estabilidad.

Todas las partes de un ecosistema son interdependientes. Todo cambio en una especie o un hábitat se retroalimentará en el sistema y lo afectará por entero, incluida la parte donde empezó. En otras palabras, la retroalimentación circula en forma de bucle.

En algunas situaciones, el bucle mantiene a raya los cambios. Por ejemplo, si se multiplican repentinamente los áfidos, hay más alimento para las mariquitas, y aumenta su número. Con más mariquitas alimentándose de áfidos, sin embargo, el número de estos se reduce, y esta retroalimentación negativa contribuye a mantener el estado anterior.

En otros casos, la retroalimentación acelera los cambios. Los arbustos, por ejemplo, al suceder a la hierba en tierra colonizada, proyectan sobre esta su sombra, la privan de luz y retrasan su crecimiento. Al disponer de más agua y nutrientes, los arbustos prosperan a expensas de la hierba. Esta retroalimentación positiva es inherentemente desestabilizadora.

Las ideas sobre bucles de retroalimentación surgieron a principios del siglo xx, basadas en el trabajo de dos matemáticos –el estadounidense Alfred Lotka (1880–1949) y el italiano Vito Volterra (1860–1940)– que

Véase también: El principio de exclusión competitiva 52–53 ▪ Calentamiento global 202–203 ▪ Detener el cambio climático 316–321



En un ecosistema sano, la fluctuación del número de presas, como los conejos, y de depredadores, como los zorros, es un ejemplo de bucle de retroalimentación negativa que equilibra el sistema.

formularon ecuaciones basadas en la interacción depredadores-presas. Las ecuaciones mostraban que una población de presas crece rápidamente si cae el número de los depredadores, y la de depredadores cae, por hambre, si cae el número de presas. El resultado es un ciclo constante de ascenso y caída de poblaciones de depredadores y presas.

Equilibrar el sistema

Los ciclos identificados por Lotka y Volterra se centraban en la interacción entre una única especie de depredadores y otra de presas. Hoy, la teoría de los bucles de retroalimentación abarca ecosistemas enteros. Los ecólogos consideran fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas los de retroalimentación negativa, al mantener todas sus partes dentro de los márgenes de la sostenibilidad. Las poblaciones no pueden multiplicarse mucho tiempo más allá de la capacidad de carga del resto del sistema. Así, la retroalimentación negativa regula y mantiene estables los ecosistemas. La retroalimentación positiva interfiere con los sistemas en equilibrio.

Mientras haya un excedente de recursos o ausencia de depredadores, una población crece sin trabas. Una población mayor supone más nacimientos, y una aceleración del aumento de población.

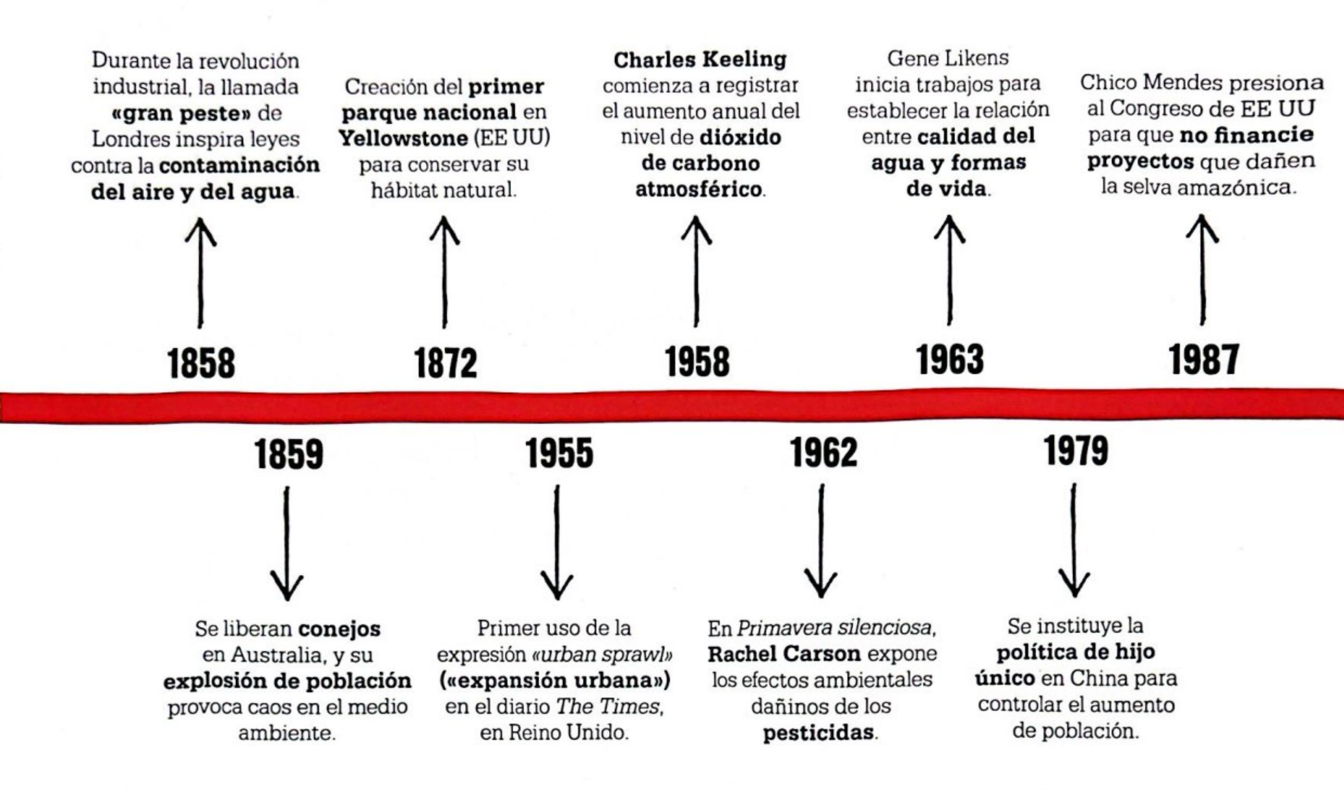
Igualmente, la retroalimentación positiva puede causar una reducción acelerada de la población. Si empiezan a escasear los peces en una laguna, la gente local podría recurrir a la importación de alimentos enlatados. La contaminación de los vertederos donde van a parar las latas puede filtrarse a la laguna, matando a los peces, y animar a la gente del lugar a importar un número mayor de las dañinas latas. Con todo, a veces los bucles de retroalimentación positiva pueden desencadenar una cadena de acontecimientos que produzca un círculo «virtuoso». Si se plantan arbustos en suelo inestable, por ejemplo, sus raíces pueden estabilizarlo, permitiendo prosperar a ambos. ■

Bucles de retroalimentación

En los últimos años, las tendencias de aceleración y deceleración del calentamiento han llevado la idea de los bucles de retroalimentación a la ciencia del cambio climático. En 1988, el científico James Hansen habló del ascenso de la temperatura global por la actividad humana, y desde entonces ha afirmado que el empleo continuado de combustibles fósiles podría desencadenar una serie de retroalimentaciones calamitosas en el clima de la Tierra, y conducir al efecto invernadero desbocado que describe en *Storms of my grandchildren* (2009). Un bucle de retroalimentación es el que se crea por la fusión de los casquetes polares, al absorber la tierra aflorada y el agua el calor que antes reflejaba el hielo a la atmósfera. Otro bucle de calentamiento es la fusión del permafrost siberiano: al derretirse, pueden liberarse a la atmósfera grandes cantidades de metano (gas de efecto invernadero), lo cual acelera el calentamiento global.



En zonas árticas como Groenlandia se ha reducido el hielo estival en un 72 % desde 1980. El ascenso térmico de la atmósfera y el del nivel del mar son parte de la retroalimentación positiva resultante.



Las aguas residuales de millones de londinenses afluyeron al río Támesis durante décadas, hasta que el hedor de esas aguas fue tal que, en 1858, se exigió tomar medidas. El nuevo sistema de alcantarillado, las estaciones de bombeo y las instalaciones de tratamiento revolucionaron el saneamiento y redujeron drásticamente las muertes por cólera y otras infecciones bacterianas, y el río quedó mucho más limpio.

La actividad humana ha alterado siempre el medio, pero su impacto aumentó radicalmente a partir de mediados del siglo XVIII con la revolución industrial iniciada en Gran Bretaña, que se difundió a Europa, América del Norte y más allá. Los efectos negativos pueden dividirse a grandes rasgos en contaminación y destrucción de recursos y hábitats.

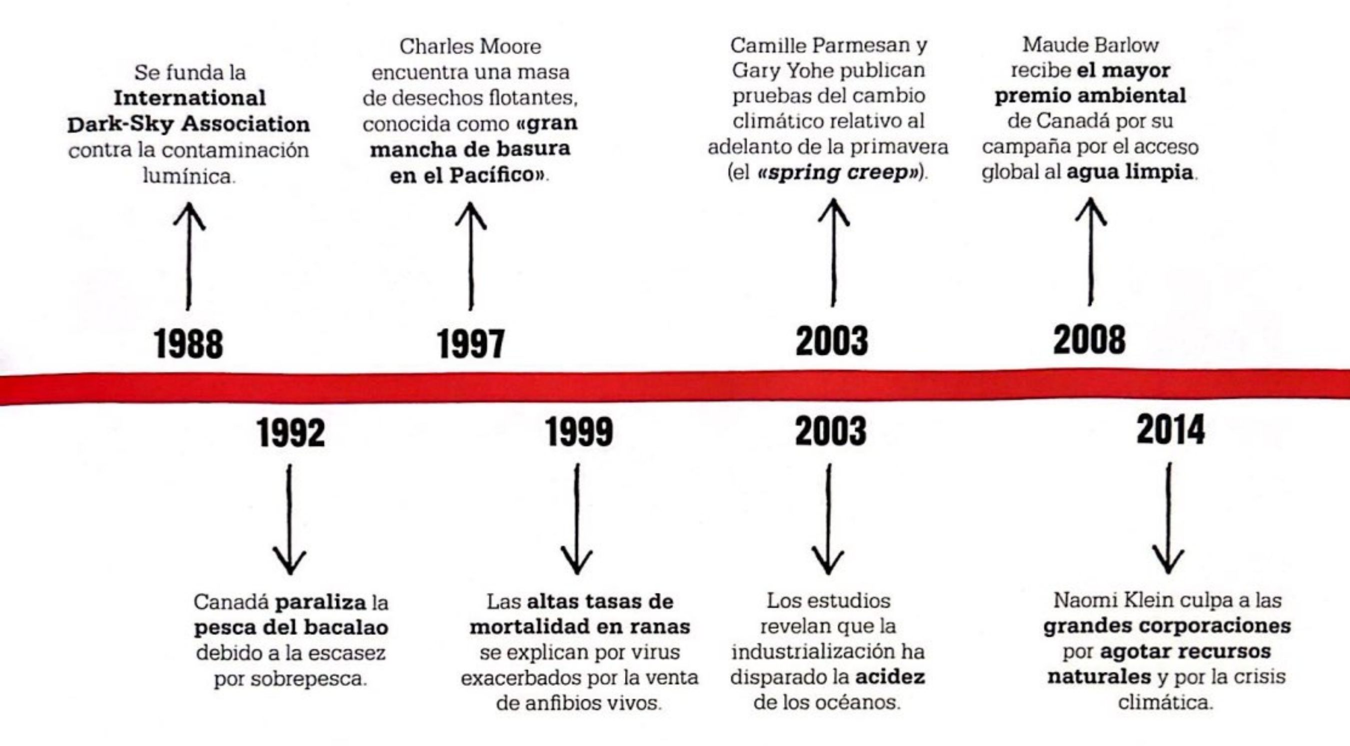
El ambientalista escocés-estadounidense John Muir fue uno de los primeros en considerar el problema de la degradación y destrucción de hábitats, y en 1890 obtuvo protección para el valle de Yosemite, en California. No obstante, a pesar del continuo aumento del número de áreas naturales protegidas, las presiones destructivas del desarrollo humano no dejaron de crecer en el siglo XX.

Árboles y cambio climático

Los bosques han resultado especialmente afectados, debido sobre todo a la demanda de madera para la construcción y como combustible y a la tala y desbroce de bosques para la agricultura y las infraestructuras. Se estima que se eliminan anualmente 140 000 km^2 de pluvisilva tropical, el medio de mayor biodiversidad. Los científicos nunca sabrán cuántas especies del bosque se extinguieron antes de poder ser «descubiertas».

La deforestación también contribuye al cambio climático global. Los árboles absorben dióxido de carbono y liberan oxígeno por fotosíntesis. Menos bosque significa más dióxido de carbono (CO_2) que permanece en la atmósfera, lo cual contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global.

Los automóviles y las fábricas que usan combustibles fósiles emiten CO_2 y otros gases de efecto invernadero. Desde 1958, las mediciones del CO_2 atmosférico realizadas por el estadounidense Charles Keeling muestran que las emisiones aumentan con rapidez creciente. Una minoría de científicos mantiene que la actividad humana no es responsable, pero el cambio climático ha calentado



los continentes. Las consecuencias, como el adelanto de la floración y del crecimiento de las hojas en los árboles, benefician a algunos organismos, pero son desastrosas para otros.

Controles tóxicos

El uso de pesticidas, como el DDT, para mejorar las cosechas produjo un desastre ambiental: erradicó tanto invertebrados dañinos como útiles, causó cáncer en humanos y volvió estériles las aves de presa. El libro de Rachel Carson *Primavera silenciosa*, de 1962, trató muchas de estas cuestiones, y obligó a replantear el uso de pesticidas. El trabajo de varios otros ecólogos logró la aprobación de controles legislativos para mitigar el impacto ambiental.

Cuando Gene Likens y su equipo investigaron la causa de la muerte de los peces en lagos donde abundaban, hallaron que la responsable era la lluvia ácida, causada por emisiones de dióxido de azufre y óxido nítrico de las chimeneas industriales, y se aprobaron leyes de control de emisiones en EE UU y Europa. Tras demostrar los químicos estadounidenses Frank Rowland y Mario Molina que los clorofluorocarbonos (CFC) destruyen el ozono atmosférico, se prohibieron en todo el mundo en 1989.

La contaminación lumínica, que afecta a las tortugas que desovan en las playas, los murciélagos y las aves migratorias, ha resultado más difícil de controlar. La International Dark-Sky Association está al frente de las campañas por una iluminación responsable con el medio.

Recursos reducidos

El estadounidense Garrett Hardin advirtió de los riesgos de la sobrepoblación en 1968, cuando la población mundial era de 3600 millones de personas; en 2018 llegó a los 7600 millones. La tasa de crecimiento se ha ralentizado, pero el consumo creciente de recursos naturales ha reducido las reservas de madera, combustibles fósiles, minerales y peces. En 1992, el colapso de la pesquería bacaladera en aguas de Terranova demostró que la cadena alimenticia es vulnerable a la sobrepesca, y llevó al gobierno de Canadá a imponer una moratoria indefinida sobre la pesca en el Gran Banco.

El agua limpia es una de las condiciones más básicas para la vida, pero casi mil millones de personas carecen de acceso a la misma. Una combinación letal de cambio climático y aumento de población en regiones en desarrollo amenaza con hacer crecer esa cifra. ■

LA CONTAMINACION AMBIENTAL ES UNA ENFERMEDAD INCURABLE

CONTAMINACIÓN



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Emma Johnston (n. 1973)

ANTES
1272 Eduardo I de Inglaterra prohíbe quemar carbón en Londres por el humo que produce.

Siglo XIX El humo del carbón de la revolución industrial en Gran Bretaña afecta al crecimiento infantil y hace aumentar las muertes por enfermedades respiratorias.

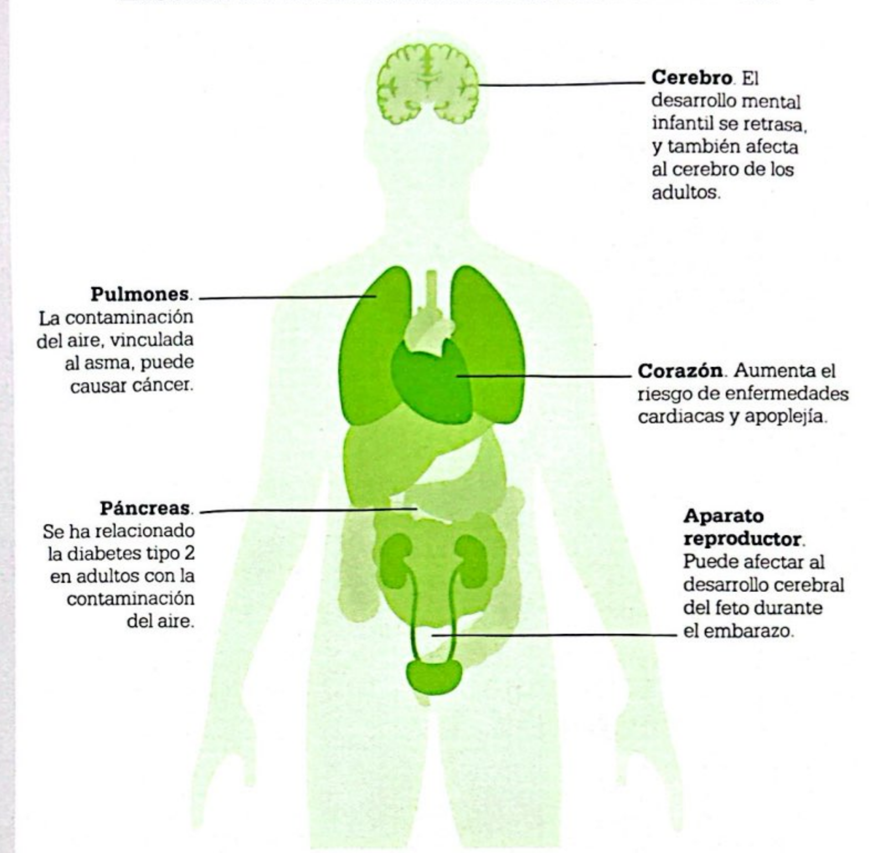
DESPUÉS
1956 La Ley de Aire Limpio introducida en Reino Unido acaba con el esmog urbano.

1963 Se aprueba la Ley de Aire Limpio en EE UU.

1972 Ratificación de la Ley de Agua Limpia en EE UU.

1984 Mueren miles de personas y enferman muchas más por los escapes de gas tóxico de la fábrica de Union Carbide India, en Bhopal.

Efectos de la contaminación sobre la salud



El aire y el agua contaminados causan la muerte a millones de personas cada año. Esta ilustración describe el daño específico a distintos órganos del cuerpo humano.

La contaminación adopta muchas formas, desde toxinas en el aire a basura en el fondo del mar. Son contaminantes todas las sustancias o formas de energía que reducen la calidad de la atmósfera, los océanos, el agua o el suelo; y pueden ser químicos o biológicos (como los desechos humanos), productos (como el plástico), ruido, luz o calor. Sus efectos sobre la vida de todo tipo pueden ser de gran alcance, y pueden llegar a miles de kilómetros de la fuente original. La contaminación se difunde por la cadena alimenticia, por el aire o el agua, afectando a toda la vida. Contaminantes como los plásticos pueden facilitar la invasión de especies no nativas, como descubrió la bióloga marina australiana Emma Johnston, y tener consecuencias para la salud humana: se cree que, en 2015, la exposición al aire, agua y suelo contaminados causaron nueve millones de muertes prematuras, una de cada seis de todas las muertes.

Contaminación histórica

La contaminación de origen humano tiene una larga historia. La presencia de hollín en las paredes de las cuevas indica que los humanos prehistóricos contaminaban el aire con sus hogueras. El análisis de testigos de hielo de Groenlandia de hace 2500 años revela pruebas de contaminación del aire por fundición de cobre a miles de kilómetros de distancia, en el centro del Imperio romano. Tales impactos eran aún de pequeña escala. Sin embargo, al comenzar la revolución industrial en Europa, la contaminación del aire y el agua fue ya grave. Las chimeneas de las fábricas escupían humo y se vertían sustancias tóxicas a los ríos. Las ciudades crecían rápidamente, y no tenían alcantarillado. En Londres, el río Támesis era a la vez fuente del

Véase también: El legado de los pesticidas 242–247 ▪ Lluvia ácida 248–249 ▪ Contaminación lumínica 252–253 ▪ Gestión de residuos 330–331



El control de la contaminación del aire va por detrás del desarrollo económico.
Bob O'Keefe



agua de uso doméstico y vertedero de aguas residuales sin tratar. Se extendió la enfermedad, los peces del río morían y el hedor era a veces insoportable. A otros centros urbanos no les fue mucho mejor: en el Berlín de 1870 constan condiciones similares.

En EE UU, las primeras dos ciudades que aprobaron leyes de aire limpio fueron Chicago y Cincinnati, en 1881. Por entonces, el estiércol de los tres millones de caballos que tiraban de los carros en las ciudades de EE UU se filtraba a las reservas de agua, y producía plagas de moscas causantes de enfermedades. Con la sustitución del caballo por el motor de combustión interna, el esmog de coches y camiones se convirtió en un gran problema. En 1952, la «gran niebla» (o «sopa de guisantes», por el color del aire contaminado) mató en Londres a más de cuatro mil personas.

Contaminación del aire

La contaminación del aire por la emisión de sustancias dañinas a la atmósfera, como gases o pequeñas partículas (aerosoles), puede tener un origen natural, caso de volcanes o incendios, pero suele deberse a la actividad humana. Los principales contaminantes de la atmósfera son las emisiones de centrales energéticas que usan combustibles fósiles, »



De las veinte ciudades con aire más contaminado del mundo, catorce están en India. En Delhi, respirar el denso esmog de noviembre de 2017 equivalía a fumar cincuenta cigarrillos diarios.

La «gran peste»

A principios del siglo XIX, el Támesis de Londres, receptor de contaminación industrial y residuos humanos de miles de desagües, era el río más contaminado del mundo. La gente se quejaba, pero el gobierno no hacía nada. En 1855, el científico Michael Faraday denunció la desidia de los políticos, sin resultado. El mensaje les llegó de forma más directa tres años más tarde, al contribuir un verano caluroso a la «gran peste» de 1858. El Parlamento, situado en la orilla del río, se vio afectado, y en solo 18 días aprobó la legislación pertinente.

Al ingeniero civil Joseph Bazalgette se le encargó el diseño de un nuevo sistema de alcantarillado, basado en seis alcantarillados de 160 km de largo, que desembocaban en nuevas instalaciones de tratamiento. Antes de una década, la mayor parte de Londres estaba conectada al sistema, en gran parte en uso todavía hoy, más de 150 años después.



Esta viñeta, publicada en la revista *Punch* en julio de 1858, se titulaba «El salteador silencioso». En la época se atribuía la difusión del cólera al hedor procedente del río.



La contaminación es uno de los mayores problemas globales, con terribles costes sociales futuros.

María Neira González

Organización Mundial de la Salud

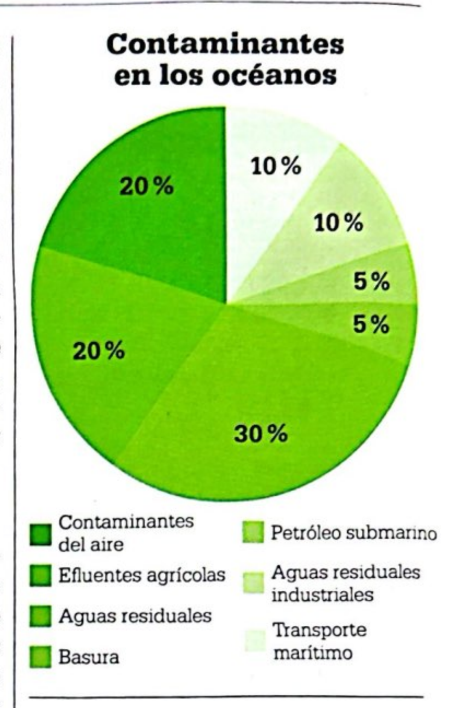


fábricas, vehículos a motor, la combustión de madera y estiércol para calentarse y cocinar y el metano procedente del ganado, de los vertederos y de los campos fertilizados. La mala calidad del aire perjudica la salud humana y los cultivos, y algunas emisiones de combustibles fósiles provocan lluvia ácida, responsable de la muerte de bosques y de peces por miles en los lagos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que nueve de cada diez personas en el mundo están respirando aire contaminado, causa de enfermedades y alergias generalizadas. Determinados aerosoles, además, según la composición y color de las partículas, reducen la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre, teniendo por tanto un efecto de enfriamiento sobre el planeta. Así, los esfuerzos por reducir la contaminación atmosférica pueden agravar los efectos del calentamiento global.

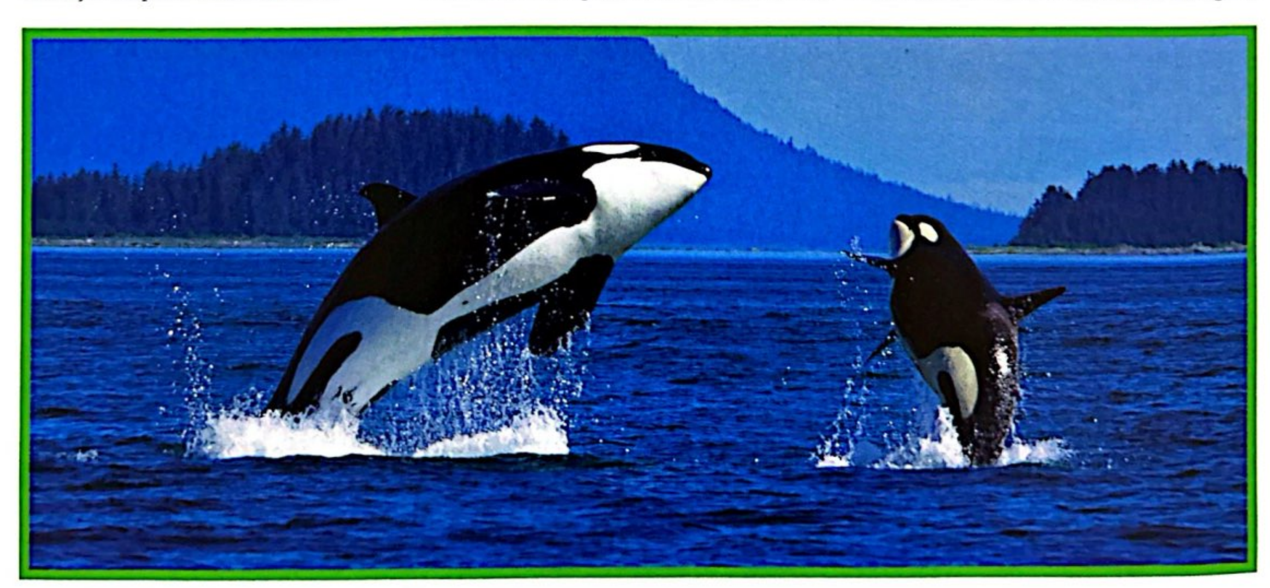
Ríos, lagos y mares

Las aguas superficiales, subterráneas y de los océanos reciben la contaminación de sustancias tóxicas de la industria, productos químicos de las tierras de cultivo y basura de todo tipo, como los plásticos y las aguas residuales humanas.

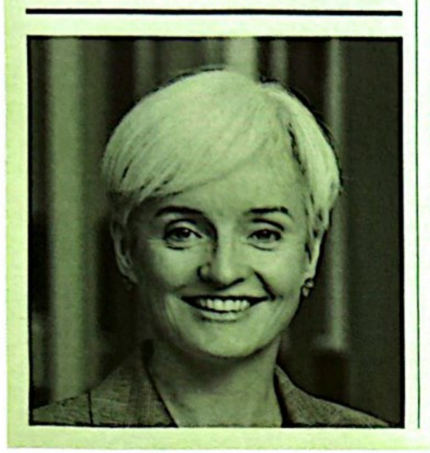
Algunos ríos y lagos están tan contaminados que no pueden sustentar vida alguna; además, privan a las comunidades de agua y alimento, y suponen el riesgo de enfermedades como la polio, el cólera, la disentería y la fiebre tifoidea. Según la OMS, 2000 millones de personas en el mundo beben agua contaminada por residuos humanos, lo cual causa 500 000 muertes al año. En los océanos, la contaminación más destructiva procede de los vertidos de petroleros y depósitos. Cuando encalló el superpetrolero *Exxon Valdez* en la costa de Alaska, vertió 50 millones de litros de crudo al Pacífico Norte. El crudo ahogó o



Las orcas podrían extinguirse debido a los bifenilos policlorados (BPC). Estos compuestos se van concentrando al ascender por la cadena trófica, en cuya cúspide están las orcas.



Emma Johnston



La bióloga marina australiana Emma Johnston, nacida en 1973, se interesó por los océanos a una edad temprana. Doctorada en biología marina en 2002, en 2017 llegó a ser decana de ciencias de la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW). Allí dirigió el laboratorio de ecología aplicada marina y de estuarios, que estudia el impacto de la actividad humana sobre los ecosistemas marinos.

Johnston descubrió cómo especies no nativas invaden cursos de agua en zonas costeras al adherirse a cúmulos de desechos plásticos flotando en los océanos. También estudió las comunidades marinas antárticas y desarrolló técnicas de monitorización biológica, y ha sido consultora de gestión de biodiversidad de estuarios.

Obras principales

2009 «Contaminants reduce the richness and evenness of marine communities», *Environmental Pollution.*
2017 «Building "blue": an eco-engineering framework for foreshore developments», *Journal of Environmental Management*.

envenenó a unas 250 000 aves marinas, 2800 nutrias marinas, 300 focas comunes, 250 águilas calvas y 22 orcas. Murieron también miles de millones de huevos de salmón y arenque. Otra catástrofe se produjo durante la guerra de Irak, cuando las fuerzas iraquíes abrieron las válvulas de un depósito costero y vertieron 1700 millones de litros de crudo al golfo Pérsico. Los efectos a largo plazo de tales desastres están por ver y comprender del todo. Gran parte de nuestros productos biodegradables acaban en los océanos. Desde la década de 1950 se han producido unos 8300 millones de toneladas de plástico, del cual solo se ha reciclado la quinta parte. Cada año llegan a los océanos ocho millones de toneladas de plásticos, responsables de la muerte de numerosos animales marinos.

Contaminantes intangibles

La contaminación en forma de energía (luz, ruido o calor) puede resultar tan invasiva como los residuos o las emisiones químicas. La contaminación lumínica de edificios, del alumbrado urbano, de vehículos y letreros luminosos fue considerada un problema por primera vez en Nueva York en la década de 1920. Causa problemas a los animales nocturnos, al interrumpir la relación habitual entre depredadores y presas. El ruido excesivo puede resultar perturbador en las ciudades, las rutas aéreas y cerca de fábricas y carreteras. Hay pruebas de que algunas aves cantan ahora de noche, al escucharse mejor su canto que de día. También el calor residual puede ser dañino. Cuando se usa el agua de los ríos o del mar para enfriar los mecanismos de fábricas o centrales energéticas, el agua caliente que se devuelve a la fuente es una forma de contaminación térmica. Puede matar a los peces y alterar la composición de la cadena trófica, reduciendo la biodiversidad.



En 2015, la contaminación causó tres veces más muertes que el sida, la tuberculosis y la malaria juntos.
Philip Landrigan



La energía nuclear se considera a veces más «limpia» que la de los combustibles fósiles, al no producir gases de efecto invernadero, pero sí deja residuos que permanecen radiactivos durante miles o millones de años. La industria nuclear trae también consigo el riesgo inherente de daños accidentales. En 1986, una explosión en la central nuclear de Chernóbil (Ucrania) mató a docenas de personas y emitió radiación sobre Europa occidental. Se espera que tarden un siglo en desaparecer los efectos de esta contaminación sobre el ecosistema y la salud humana.

Medidas compensatorias

Resolver el problema de la contaminación es un gran desafío, y supone tanto limpiar la ya existente como realizar cambios para reducir la tasa a la que contribuimos a la misma. Son aspectos clave la sustitución de los combustibles fósiles por energía sostenible, más reciclaje y reutilización y la sustitución de materiales no biodegradables por biodegradables. Esto llevará tiempo y, en último término, exigirá un cambio profundo en nuestra cultura del consumo. ■

DIOS NO PODRÁ SALVAR ESTOS ÁRBOLES DE LOS IGNORANTES

HÁBITATS EN PELIGRO



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
John Muir (1838–1914)

ANTES
1872 Yellowstone, en los estados de Wyoming, Montana e Idaho, declarado primer parque nacional del mundo.

DESPUÉS
1948 Fundación de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza; en ella participan gobiernos y organizaciones civiles.

1961 Se forma el Fondo Mundial para la Naturaleza para proteger especies y hábitats en peligro.

1971 Se funda el Programa sobre el Hombre y la Biosfera de las Naciones Unidas para promover el desarrollo sostenible. Cuenta con una red global de reservas de la biosfera.

El origen del movimiento para conservar los hábitats naturales suele atribuirse al naturalista escocés-estadounidense John Muir, considerado el «padre de los parques nacionales». Muir fue uno de los primeros en comprender que, para sobrevivir, los espacios salvajes necesitaban protección legal. Entre los tipos de hábitat natural de la Tierra, algunos son más frágiles que otros, pero cada uno se enfrenta a amenazas diferentes, sean de origen humano, natural o de ambos, y muchos están en peligro crítico.

A los hábitats, por supuesto, les han afectado siempre fenómenos naturales destructivos: cada año, los relámpagos causan grandes incendios en praderas y bosques, y los hu-

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ Puntos calientes de la biodiversidad 96–97 ▪ Deforestación 254–259 ▪ Ética ambiental 306–307



El Parque Nacional de Yosemite se creó en 1890 gracias a los esfuerzos de John Muir. Es famoso por sus glaciares, cascadas y formaciones graníticas, como la masa rocosa El Capitán (izda.).

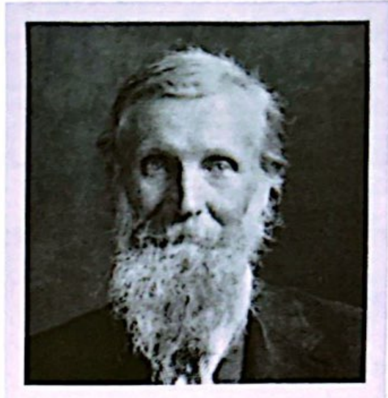
racanes y riadas pueden ser también catastróficos. Las marejadas ciclónicas provocan inundaciones del mar, volviendo salinos los humedales de agua dulce. Hace unos 66 millones de años, el impacto del meteorito de Chicxulub levantó una nube de polvo tal que impidió la llegada de luz solar al planeta. Las plantas tuvieron gran dificultad para realizar la fotosíntesis, y muchos animales, entre ellos los dinosaurios, se extinguieron.

Tampoco la influencia humana es un fenómeno reciente. A lo largo de la historia, los humanos han modificado el medio. La deforestación, por ejemplo, no es un problema nuevo. En Europa se empezaron a despejar los bosques para la agricultura y la construcción hace miles de años, y lo mismo ocurrió en América después.

El impacto de la humanidad actual sobre el medio no tiene precedentes. En los últimos 200 años se ha producido una explosión de población, la cual ha alimentado el rápido crecimiento de las ciudades, el desarrollo industrial a gran escala basado en la extracción de combustibles fósiles y materias primas, una demanda agrícola creciente para alimentar a más personas y el conflicto y la guerra. Todo ello ha tenido un coste para el mundo natural.

Ecorregiones frágiles

Un concepto que se suele usar hoy para identificar los principales tipos de hábitat es el de ecorregión, menor que un bioma y con un rango de biodiversidad más detallado. Las ecorregiones se definen como grandes unidades de tierra o agua que contienen una mezcla característica de especies, comunidades naturales y condiciones ambientales. Entre los »



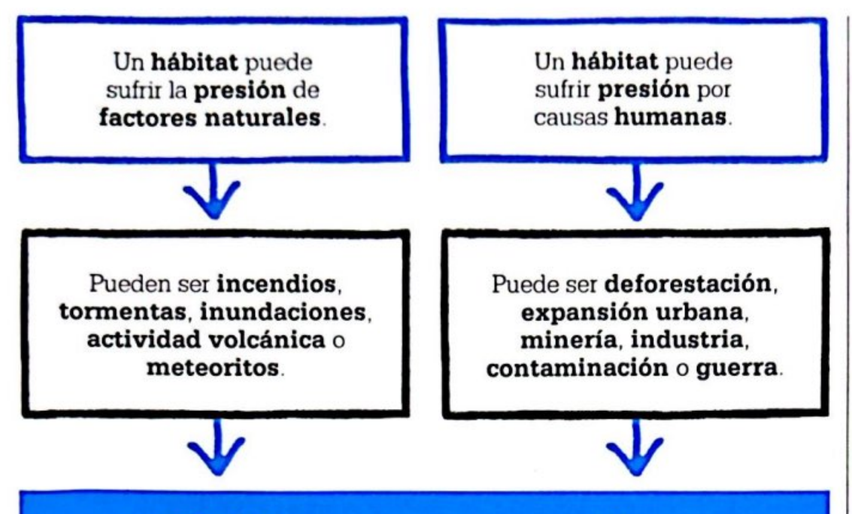
John Muir

A John Muir, nacido en Escocia en 1838, le apasionó desde niño la naturaleza. Con once años se trasladó con su familia a Wisconsin (EE UU). En 1867 perdió temporalmente la vista a causa de un accidente, y en adelante dijo «ver el mundo bajo otra luz». Botánico, geólogo y glaciólogo consumado, Muir visitó el valle de Yosemite, en California, en 1868, y más tarde decidió protegerlo del azote del ganado ovino, al que llamaba «langostas con pezuñas». En 1903, Muir acompañó a Theodore Roosevelt, por entonces presidente del país, en una visita guiada por el valle de Yosemite, en un viaje de tres días que inspiraría a Roosevelt la creación del Servicio Forestal de EE UU y, en 1916, de la Comisión Nacional de Conservación.

Hasta su muerte, en 1914, Muir se esforzó en defender la conservación de lugares como el monte Rainier, que fue declarado parque nacional en 1899.

Obras principales

1874 *Studies in the Sierra.*
1901 *Our national parks.*
1911 *My first summer in the Sierra.*



ejemplos hay desiertos, pluvisilvas tropicales, bosques templados de coníferas, lagos, manglares y arrecifes de coral. Estos últimos y las pluvisilvas tropicales están especialmente amenazados por la humanidad.

Tala de pluvisilva

Pese a cubrir solo el 6 % de la superficie emergida de la Tierra, las pluvisilvas tropicales representan la mayor biomasa de todas las ecorregiones terrestres, y albergan un 80 % de las especies terrestres. Cada año se despejan unos 140 000 km² de pluvisilva, el equivalente de un campo de fútbol por segundo. La tala se practica para obtener leña y material de construcción, y la estimula también la demanda de carreteras, asentamientos y agricultura. Las pluvisilvas más amenazadas en el mundo son las de África occidental, América Central y el Sureste Asiático. Solo queda un 30 % de los bosques del llano en Borneo. En la cuenca del Amazonas, que representa casi un tercio de la pluvisilva mundial, se despeja bosque sobre todo para actividades agropecuarias, y en particular, para ranchos.

Una vez comienza la deforestación, el problema se agrava rápidamente. Cuando llueve sobre una ladera boscosa, la vegetación absorbe la mayor parte del agua. Una vez despejada dicha ladera, la lluvia erosiona el suelo, dejándolo inútil para la agricultura y sin que se pueda replantar. El limo arrastrado hasta los ríos mata peces y aumenta el riesgo de inundación. La destrucción de bosques reduce la absorción de dióxido de carbono de efecto invernadero, contribuyendo así a la aceleración del cambio climático.

Pérdida de arrecifes de coral

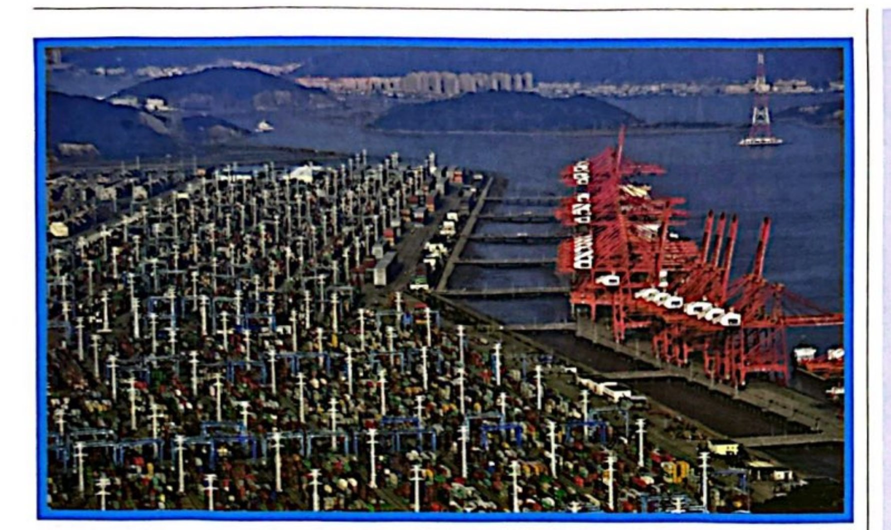
Los arrecifes de coral son ecorregiones importantes, y están especialmente amenazados. Albergan en torno a un 25 % de las especies marinas, y son el criadero de miles de millones de peces. Dos tercios de los arrecifes del mundo están amenazados, y la cuarta parte está probablemente dañada sin remedio. La mayor amenaza para los arrecifes podría ser el aumento de la acidez por la mayor absorción de CO_2 de la atmósfera. Esto impide a muchas criaturas marinas construir sus conchas, y provoca el blanqueo del coral, que es un paso hacia la muerte del arrecife. Los arrecifes están siendo destruidos también por la sobrepesca, por prácticas como la pesca con cianuro sódico y explosivos y por la pesca de arrastre. Los sedimentos procedentes del desarrollo costero bloquean la luz solar que necesitan los arrecifes. La polución química, la minería del coral y el turismo contribuyen a la carga que soporta este hábitat tan sensible.

Impactos de amplio alcance

Por todo el mundo, hábitats naturales diversos están muy amenazados por la actividad humana. El bosque seco caducifolio es más fácil de despejar que la pluvisilva, y en Madagascar, donde abundaba el bosque seco, queda hoy menos del 8 %. La pradera de hierba alta se extendía por el Medio Oeste de EE UU, pero hoy queda el 3 %, y el resto se ha convertido en tierras de cultivo. Muchos humedales han sido desecados



La palma aceitera se está plantando a gran escala en Indonesia y Malasia. Es una de las principales causas de la deforestación, y los orangutanes son una de las especies en peligro por ello.



Los humedales y las zonas intermareales son claves para los invertebrados marinos y las aves migratorias. La industria y los puertos han acabado con ellos en muchas partes del mundo.

para la agricultura o el desarrollo urbano; otros están irreversiblemente dañados por la contaminación. Los nutrientes residuales de fertilizantes agrícolas han arruinado lagos y ríos. Las zonas intermareales se han destruido para construir puertos. El desarrollo costero es en gran medida responsable de la pérdida del 35 % de los manglares. En zonas tropicales y subtropicales, se cree que el sobrepastoreo ha convertido en desierto 9 millones de km² de pradera estacionalmente seca y de matorral.

Parar el declive

La destrucción de estos hábitats no supone solo una pérdida de belleza natural y biodiversidad, sino que también causa problemas graves a las personas: degradación de la calidad del agua, reservas pesqueras en declive, desplomes de las poblaciones de animales polinizadores, inundaciones por la mayor escorrentía superficial y acumulación más rápida de gases de efecto invernadero. La conservación es hoy primordial, y se trabaja para mejorar el conocimiento de los mejores modos de lograrla.

Las medidas dependen de la situación, y van desde la creación de reservas protegidas o corredores para comunicar zonas que han quedado fragmentadas hasta planes para recrear hábitats perdidos. Son también importantes las fuentes sostenibles de combustible y madera para quienes dependen del bosque, como lo es la prohibición del comercio de maderas duras tropicales. El impacto de la destrucción de hábitat es global, y, por lo tanto, son clave los acuerdos y la cooperación internacionales. ■



Un paseo en la naturaleza da siempre mucho más de lo que se necesita.
John Muir



Áreas protegidas

En los diferentes tipos de áreas protegidas, como los parques nacionales o las reservas naturales, la interferencia con el medio está prohibida o legalmente limitada. Ocupan una extensión delimitada de tierra o aguas marinas, pero su tamaño y el grado de protección del que se benefician pueden variar mucho. Tienen carácter protegido algo más del 10 % de la tierra del planeta y solo el 1,7 % de los océanos. Las reservas marinas son clave, pero requieren el acuerdo de autoridades locales y nacionales para cuestiones como los derechos de pesca.

Marae Moana, el área marina protegida más extensa de la Tierra, cubre 2 millones de km² alrededor de las islas Cook en el océano Pacífico. Allí viven tortugas marinas, 136 especies de coral y 21 tipos de ballenas y delfines. La mayor reserva terrestre es el Parque Nacional del Noreste de Groenlandia, casi 1 millón de km² de inlandsis y tundra.



Los bueyes almizcleros son animales árticos de manada cuyo número se redujo drásticamente por la caza en el siglo XIX. Hoy viven en reservas en Alaska, Noruega y Siberia.



ASISTIMOS A LOS INICIOS DE UN CAMBIO ACELERADO DEL PLANETA

LA CURVA DE KEELING

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Charles Keeling (1928–2005)

ANTES
1896 El químico sueco Svante Arrhenius estima cuánto podría aumentar la temperatura de la Tierra el CO_2 atmosférico.

1938 Al comparar datos históricos de temperatura y mediciones de CO_2, el ingeniero y científico británico Guy Stewart Callendar concluye que el calentamiento de la atmósfera se debe al aumento del CO_2.

DESPUÉS
2002 El satélite ENVISAT, de la Agencia Espacial Europea, comienza a hacer hasta cinco mil lecturas diarias de gases de efecto invernadero.

2014 El satélite Orbiting Carbon Observatory (OCO), de la NASA, genera hasta 100 000 medidas de CO_2 de alta precisión diarias.

La curva de Keeling, así llamada por el científico estadounidense Charles Keeling, refleja el registro diario de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, medido en partes por millón en volumen (ppmv), en una serie que se remonta a 1958. La curva muestra la respiración estacional natural de la Tierra, y también el incremento anual del CO_2 atmosférico. Esto es importante, porque el CO_2 es el principal de los gases de efecto invernadero que atrapan el calor en la atmósfera. Un número mayor de moléculas de CO_2 atrapa más calor, causando un aumento general de la temperatura y el cambio climático global.



Éramos testigos por primera vez de cómo la naturaleza retira CO_2 del aire para el crecimiento vegetal durante el verano, y lo devuelve cada invierno.
Charles Keeling



Medir los niveles de CO_2

Desde el inicio de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, la actividad humana ha producido emisiones crecientes de CO_2. Esto se debe en gran medida al uso de combustibles fósiles, mientras que los bosques despejados para el cultivo suponen menos vegetación que absorba CO_2 durante la fotosíntesis. Muchos científicos creyeron que los océanos absorberían el exceso de CO_2, idea que rechazaron otros, pero no había pruebas concluyentes en uno u otro sentido.

Keeling no fue el primero en vincular el calentamiento atmosférico con las emisiones de CO_2; otros habían medido niveles de CO_2, pero solo tomaron «instantáneas» puntuales, no el conjunto de datos a largo plazo que Keeling sabía necesario para establecer el vínculo. En 1956, Keeling ocupó un puesto en la Scripps Institution of Oceanography, en San Diego (California), y obtuvo fondos para instalar observatorios en localizaciones remotas, a 3000 m de altura en el volcán Mauna Loa (Hawái) y en el Polo Sur. En 1960, Keeling creyó tener registros suficientes para detectar un incremento anual.

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ La biosfera 204–205 ▪ Bucles de retroalimentación ambiental 224–225 ▪ Detener el cambio climático 316–321

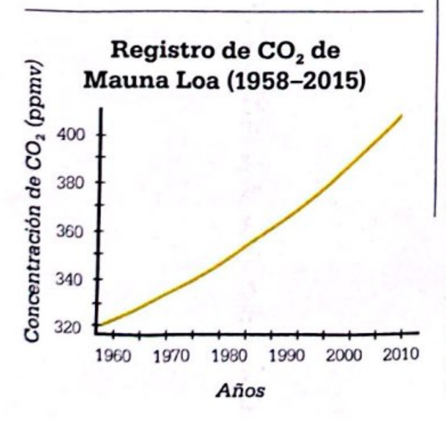


Mauna Loa, en Hawái, es el lugar ideal para un observatorio atmosférico. La gran altitud y lo remoto del volcán garantizan un aire escasamente afectado por los seres humanos o la vegetación.

Cambios estacionales

Aunque la financiación para el Polo Sur se suspendió en 1964, del Mauna Loa han seguido llegando datos desde 1958. Reflejadas en un gráfico, las mediciones describen la llamada curva de Keeling, que es de hecho una serie de curvas anuales que reflejan cambios estacionales. Durante la primavera y el verano del hemisferio norte, al absorber el follaje nuevo más CO_2 de la atmósfera, la concentración global del gas disminuye, alcanzando el mínimo en septiembre. Vuelve a aumentar durante el otoño en el hemisferio norte, al caer las hojas y reducirse la fotosíntesis. El crecimiento vegetal en el hemisferio sur no compensa la pérdida, ya que la mayor parte de la cubierta vegetal terrestre se encuentra en el norte.

Antiguas burbujas de aire atrapadas en el hielo polar revelan que, en los últimos 11 000 años, las concentraciones medias de CO_2 fueron de entre 275 y 285 ppmv, pero aumentaron rápidamente a mediados del siglo XIX. En 1958 era de 316 ppmv. Continuó aumentando 1,3–1,4 ppmv anuales hasta mediados de la década de 1970, y, desde entonces, aproximadamente 2 ppmv al año. En la primavera de 2018 alcanzó los 411 ppmv, casi 1,5 veces más que los niveles preindustriales. ■



La curva de Keeling de aumento regular de los niveles de CO_2 se aprecia claramente en el gráfico con los datos de dióxido de carbono atmosférico del observatorio de Mauna Loa (Hawái).

Análisis del CO_2 de los casquetes polares

Los científicos pueden medir concentraciones de CO_2 del pasado por medio del análisis de las burbujas de aire atrapadas en los inlandsis del Antártico y de Groenlandia. Se sabe que ha habido varios ciclos de variación de esos niveles en los últimos 400 000 años, con lecturas bajas durante las glaciaciones más severas –cuando los glaciares se formaron– y otras más altas en los periodos interglaciares, más cálidos. El aumento de los niveles de CO_2 desde el inicio de la revolución industrial se corresponde con el aumento de la temperatura global, que ha subido por década 0,07 °C desde 1880 y 0,17 °C desde 1970.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) advierte de que, si los gobiernos no reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, en 2100 las temperaturas podrían superar en unos 4,3 °C las anteriores a la revolución industrial. Dicho aumento causará una subida notable del nivel del mar, y obligará a evacuar por completo algunas regiones del planeta.



Las burbujas de un testigo de hielo son muestras de la atmósfera de siglos atrás. Los científicos miden el CO_2 del aire que contienen.

SE HA LANZADO UNA ANDANADA QUIMICA CONTRA EL TEJIDO DE LA VIDA

EL LEGADO DE LOS PESTICIDAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Rachel Carson (1907–1964)

ANTES
1854 En el inspirador libro *Walden*, Henry David Thoreau describe un experimento social para vivir una vida sencilla en la naturaleza.

1949 *A Sand County Almanac*, de Aldo Leopold, propone una ecología profunda de vida en armonía con la tierra.

DESPUÉS
1970 Se crea la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE UU.

1989 *The end of nature*, de Bill McKibben, habla de los peligros del calentamiento global.

2006 El documental *Una verdad incómoda* refleja los esfuerzos de Al Gore, exvicepresidente de EE UU, por concienciar del cambio climático.

Primavera silenciosa, probablemente el libro más venerado e influyente que se ha publicado sobre temas ecológicos, alcanzó una gran resonancia en el momento de su publicación en 1962. Galvanizó al incipiente movimiento ecologista, obligó a cambiar las leyes y, quizá lo más importante, defendió el derecho del público a cuestionar y pedir cuentas a quienes ejercen el poder.

La autora del libro, sin embargo, distaba mucho de ser una «ecoguerrera» al uso, expresión que, por otra parte, ni existía al publicarse el libro. Rachel Carson era una mujer sosegada y erudita, con un máster en zoología y veinte años de servicio como bióloga acuática en EE UU. Ante todo, era una escritora excepcional, capaz de combinar ciencia cabal y narrativa cautivadora.

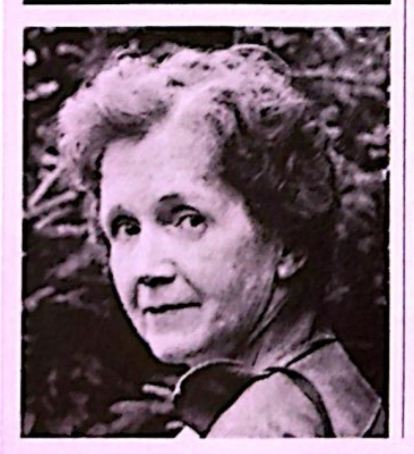
Vida salvaje moribunda

Como muchas influyentes grandes obras, *Primavera silenciosa* nació de un modo muy personal: en enero de 1958, Olga Huckins, amiga de Carson, le envió una carta que había intentado publicar en el *Boston Herald*. La carta hablaba de la fumigación aérea de una mezcla de fueloil y un compuesto químico llamado DDT (dicloro difenil tricloroetano) cerca de su pequeña reserva de aves en Míchigan. La mañana posterior al fumigado, Huckins encontró varias aves muertas en su propiedad, y esperaba que Carson conociera a alguien en Washington que pudiera detener las fumigaciones. Carson, indignada, decidió ayudar. Desde hacía más de una década le llegaban noticias de incidentes perturbadores en los que la fumigación indiscriminada con DDT mataba la vida salvaje. Carson



El fumigado con insecticidas como el DDT, en interior o exterior, fue un método habitual para controlar a los mosquitos que transmiten la malaria, y en algunos países aún lo es.

Rachel Carson



Rachel Carson nació en 1907 y se crió en una granja de Pensilvania, en donde creció su amor por la naturaleza. Obtuvo una beca para el Pennsylvania College for Women, y luego un máster en zoología. Mientras se criaba en un estado del interior, ella soñaba con el océano; esta pasión resultó duradera, y comenzó a trabajar como bióloga acuática para el Servicio de Pesca y Vida Silvestre (FWS) de EE UU.

Carson escribió y publicó numerosos folletos educativos, y acabó siendo editora jefe del FWS. A partir de 1941, escribió libros sobre biología marina, como *El mar que nos rodea*, ganador del Premio Nacional del Libro, y muy vendido en todo EE UU. El éxito permitió a Carson dedicarse a la escritura a tiempo completo, y empezó a trabajar en *Primavera silenciosa* en 1958. En 1960 le diagnosticaron un cáncer de mama, y murió en 1964.

Obras principales

1941 *Bajo el viento oceánico.*
1951 *El mar que nos rodea.*
1955 *The edge of the sea.*
1962 *Primavera silenciosa.*

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ Ecología animal 106–113 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Una perspectiva holística de la Tierra 210–211 ▪ Devastación humana de la Tierra 299 ▪ Ética ambiental 306–307

se dirigió al editor de *The New Yorker*, E. B. White, para pedir que la revista publicara un artículo sobre la preocupación creciente por los pesticidas sintéticos y sus efectos no buscados sobre otros organismos. White sugirió que lo escribiera ella misma. Carson se resignó, y comenzó a investigar para lo que en un principio llamó el «libro del veneno», que habría de estremecer al mundo.

El futuro químico

Hay que considerar el impacto de *Primavera silenciosa* en el contexto de su época. Aunque algunos intelectuales y científicos hubieran expresado su preocupación por los pesticidas sintéticos, el público era ignorante del asunto.

Los pesticidas sintéticos llevaban usándose desde la década de 1920, pero habían progresado mucho durante la Segunda Guerra Mundial, gracias a estudios financiados con fondos militares. En la década de 1950, era común creer que los pesticidas resolverían los problemas del hambre y la enfermedad, al matar plagas que destruían los cultivos y transmitían enfermedades. Las campañas publicitarias de gigantes del sector químico como Union Carbide, DuPont, Mobil y Shell difundieron el mensaje a un público muy amplio. *Primavera silenciosa* se enfrentaba a las nociones imperantes al afirmar que el supuesto progreso científico de los EE UU de posguerra tendría un precio muy alto para el medio ambiente.

El pesticida de peor fama, y el más asociado a *Primavera silenciosa*, era el DDT, sintetizado por primera vez a finales del siglo XIX. En 1939, el químico suizo Paul Hermann Müller comprendió que podía servir para matar a muchos tipos de insectos, dada su amplitud de espectro como agente nervioso. Se usó durante la Segunda Guerra Mundial para controlar insectos que destruían cultivos vitales, así como los que transmitían la malaria, el tifus y el dengue a las tropas.

El DDT resultaba barato de producir y muy eficaz, y en principio no parecía peligroso para los seres humanos. Acabada la guerra, dada la abundancia del DDT, su uso en la agricultura era el siguiente paso lógico. Con su gama de aplicaciones aparentemente seguras, debió de parecer una panacea a los agricultores, que fumigaron sus cultivos alegremente, a menudo sin emplear máscaras ni ropa de protección, ya que no estaban al tanto de la potente toxicidad de este compuesto químico.

Después del DDT llegaron muchas otras sustancias agroquímicas, entre ellas la aldrina, la dieldrina, el paratión, el malatión, el captán y el 2,4–D. Combinados con fertilizantes hechos con el nitrógeno sobrante que ya no era necesario para fabricar explosivos, permitieron intensificar »



Desde *Primavera silenciosa* ya no fue tan fácil vender la contaminación como la otra cara inevitable del progreso.
H. Patricia Hynes

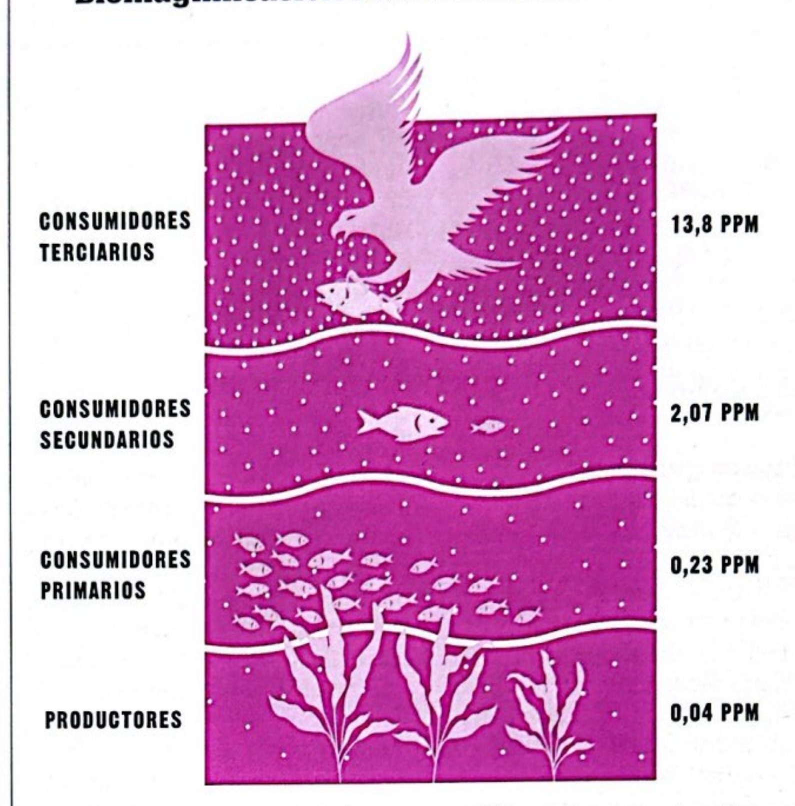




Un veneno persistente

El compuesto organoclorado DDT, esto es, dicloro difenil tricloroetano, mata a los insectos por contacto, al interferir en sus impulsos nerviosos. Es liposoluble, y se deposita en los tejidos de los animales expuestos, directamente, o al ingerir alimento contaminado. Con la exposición repetida, se acumula en la grasa corporal con efectos tóxicos. El DDT se biomagnifica en lo alto de la cadena trófica. Los humanos son susceptibles a la intoxicación por exposición regular al DDT, y si bien no se conocen el efecto de cantidades pequeñas en el medio, se ha relacionado con cáncer, abortos, infertilidad y diabetes. Hoy está prohibido en los países occidentales, pero estudios realizados por el Centro de Control de las Enfermedades y Prevención de EE UU en 2003–2004 hallaron DDT, o su derivado (DDE), en la sangre del 99 % de los participantes.

Biomagnificación del DDT en la cadena trófica



Los organismos en lo alto de la cadena trófica son los que más sufren el impacto del DDT. En los productores, el veneno está en solo 0,04 ppm (partes por millón), pero este se concentra al subir por la cadena. Entre los consumidores terciarios, los niveles son suficientes para causar efectos tóxicos.



Una sustancia tan indiscriminada como el DDT puede perturbar la economía de la naturaleza […]. El 90 % de los insectos son buenos, y matarlos pone todo patas arriba.
Edwin Way Teale



la agricultura. Había llegado la era química, y en 1952 había casi diez mil nuevos pesticidas registrados en el Departamento de Agricultura de EE UU.

Crear conciencia

Carson no fue la primera en notar los efectos dañinos del DDT. Hubo críticos anteriores, como el escritor sobre temas de la naturaleza Edwin Way Teale, quien advirtió que el fumigado con una sustancia de impacto tan indiscriminado como el DDT podía perturbar el equilibrio de la naturaleza. En EE UU, en 1945, el entonces director del Servicio de Pesca y Vida Silvestre (Fish and Wildlife Service, FWS), Clarence Cottam, manifestó que era fundamental ser cautos con el uso del DDT, pues no se conocía aún plenamente el impacto del producto. Al año siguiente, en el *American Journal of Public Health,* Fred Bishop insistía en que el DDT no debía entrar en contacto con alimentos, ni ingerirse accidentalmente.

Varios estudios e informes científicos fueron también alarmantes. En 1945, el gobierno de EE UU publicó un estudio que había detectado trazas de DDT en la leche de vacas rociadas con el producto. El estudio recomendaba a los agricultores usar «insecticidas alternativos seguros»



No deberían llamarse insecticidas, sino «biocidas».
Rachel Carson



para controlar a las moscas y piojos del ganado. En su larga trayectoria como editora jefe del FWS, Carson había tenido acceso a muchos de estos informes, y su lectura le había resultado perturbadora. Eran estudios limitados y algo desperdigados, y de ningún modo accesibles al lector medio, así que Carson decidió reunir todo el material que pudiera encontrar para presentarlo de modo comprensible al gran público. Mientras avanzaba en la redacción de *Primavera silenciosa*, Carson se convenció de que tenía el deber moral de hacer pública la información. Más allá de documentar los peligros del uso indiscriminado de pesticidas, Carson afirmaba que las empresas químicas anteponían los beneficios a las personas, y que el gobierno, conscientemente o no, era cómplice de ello por no regular la industria de un modo eficaz.

La respuesta de la industria química estadounidense fue la esperada: en un primer momento, trataron de demandar a Carson y a *The New Yorker*, que había publicado el libro por entregas. Carson estaba preparada: sabía que el libro sería polémico, y que la industria se sentiría amenazada. Por ello, además de registrar de manera meticulosa las referencias –procedentes de organismos gubernamentales, de sus contactos en centros de investigación y de otras fuentes de prestigio–, hizo revisar el manuscrito por científicos y expertos.

Fallida la vía del pleito, las empresas químicas lanzaron una campaña de desprestigio contra Carson, descendiendo a lo personal y caricaturizándola como una histérica rodeada de gatos, carente de la preparación necesaria para escribir sobre el tema. Lo único que logró la campaña fue estimular las ventas de *Primavera silenciosa*.

Nuevas políticas

Carson obtuvo el apoyo de científicos de prestigio, y el presidente John F. Kennedy la invitó a testificar ante un comité del Congreso en 1963. Allí, Carson pidió políticas nuevas que sirvieran para proteger el medio ambiente. El comité publicó un informe llamado «The uses of pesticides», que, en líneas generales, venía a respaldar el libo de Carson. Inspirados por ella, los activistas continuaron presionando al gobierno hasta que, en 1972, una década después de la primera edición de *Primavera silenciosa*, se prohibió el DDT en EE UU. Otros países también lo prohibieron, aunque algunos continúan utilizándolo contra los mosquitos.

El legado de *Primavera silenciosa* va más allá de la mera prohibición del DDT, pues mostró a los gigantes de la industria y a los gobiernos el poder de una opinión informada. ■



El hombre es parte de la naturaleza, y su guerra contra ella es, inevitablemente, contra sí mismo.
Rachel Carson





Después de prohibirse el DDT en muchos países, las muy reducidas poblaciones de águilas pescadoras –que se habían alimentado de animales afectados por el DDT– empezaron a recuperarse.



DEL DESCUBRIMIENTO A LA ACCION POLITICA: UN LARGO CAMINO

LLUVIA ÁCIDA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gene Likens (n. 1935)

ANTES
1667 El diarista inglés John Evelyn constata el efecto corrosivo del aire contaminado sobre la caliza y el mármol.

1852 El químico británico Angus Smith atribuye las precipitaciones ácidas que dañan los edificios a la contaminación industrial. Es el primero en llamarlas «lluvia ácida».

DESPUÉS
1980 El Congreso de EE UU aprueba la Ley de Deposiciones Ácidas, y pone en marcha un programa de 18 años para estudiar la lluvia ácida.

1990 En EE UU, una enmienda a la Ley de Aire Limpio (aprobada en 1963) establece un sistema diseñado para el control eficaz de las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

Los efectos de la lluvia ácida en la piedra se observaron en la Inglaterra del siglo XVII, y en la Noruega del XIX, pero no se comprendió bien el fenómeno hasta los estudios en profundidad del ecólogo estadounidense de medios de agua dulce Gene Likens en una zona rural de Nueva Hampshire.

Desde 1963, Likens y su equipo estudiaron la relación entre calidad del agua y formas de vida en la cuenca de Hubbard Brook. Descubrieron que las precipitaciones eran inusualmente ácidas. La acidez, expresada en pH (potencial de hidrógeno), va de 0 (acidez máxima), pasando por 7 (neutral), hasta 14 (acidez mínima). Para la mayoría de peces y animales acuáticos son ideales valores de pH de entre 6 y 8, y Likens se estaba encontrando con un valor de 4: demasiado ácido para los peces, las ranas y los insectos que estos necesitan para sobrevivir. Likens estableció puestos de observación en el área de Nueva Inglaterra, constatando que la lluvia y la nieve ácidas eran generalizadas en los estados densamente poblados y muy industrializados del noreste. Su trabajo sistemático convenció al gobierno de EE UU de la necesidad de controlar las emisiones de sustancias causantes de la lluvia ácida.

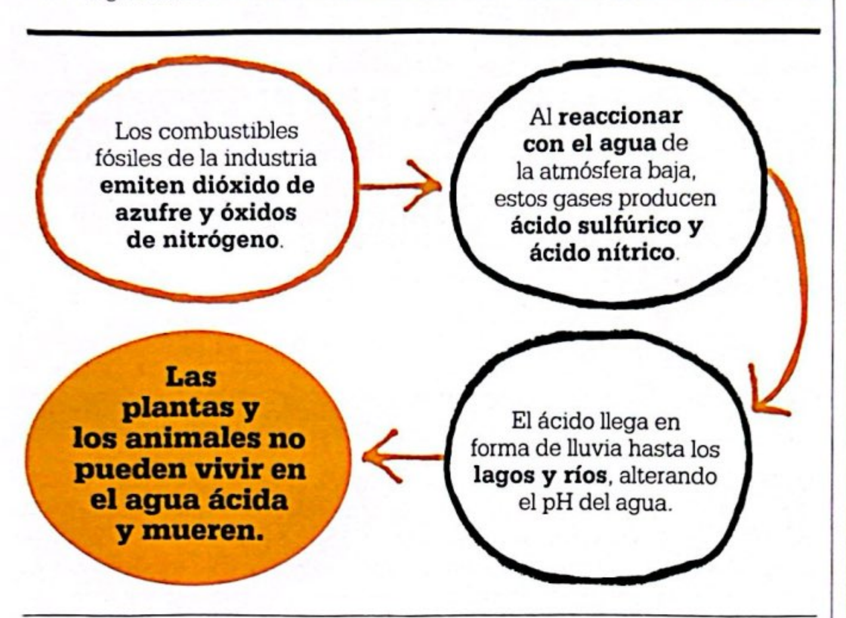


La lluvia ácida llevaba cientos de años desgastando piedra –como la de esta estatua de la iglesia de San Pedro y San Pablo en Cracovia (Polonia)– antes de que se comprendiera el fenómeno.

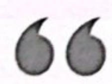
Efectos de la lluvia ácida

Al quemar combustibles fósiles, las chimeneas de las centrales energéticas y fábricas escupen dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno, que se propagan por las capas in-

Véase también: Hábitats en peligro 236–239 ▪ El legado de los pesticidas 242–247 ▪ Agotamiento de recursos naturales 262–265 ▪ Acidificación de los océanos 281



feriores de la atmósfera, reaccionan con el agua y producen ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) diluidos. Estos caen en forma de lluvia y acidifican el agua de ríos y lagos, perjudicando a plantas y animales. Los caracoles de agua dulce desaparecen, los huevos de los peces no eclosionan, y los insectos y las ranas que los comen mueren. Llega un punto en que los lagos no albergan ya vida alguna. A inicios de la década de 1970, miles de lagos en Escandinavia se habían quedado sin peces. En 1984 no los había ya en el lago Brooktrout y otros de los montes Adirondack del estado de Nueva York. La lluvia ácida libera aluminio dañino del suelo; las nubes y la niebla ácidas reducen la capacidad fotosintética, y matan a las plantas.

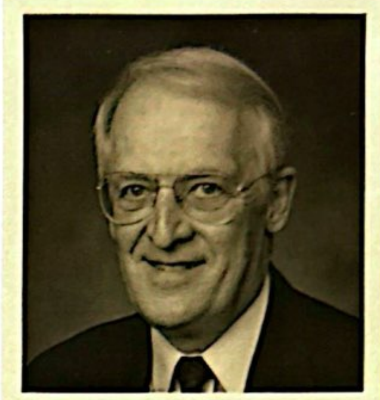


Pasamos ocho años en la negación, pero eso no es inusual en cuestiones ambientales.
Gene Likens



Control de emisiones

En las décadas de 1970 y 1980, otra zona gravemente afectada por la lluvia ácida fue el «triángulo negro» de Checoslovaquia, Alemania y Polonia, donde murieron áreas extensas de bosque. Gracias al trabajo de Likens, se aprobaron controles más estrictos después de 1990. Se instalaron sistemas depuradores en las chimeneas de las centrales energéticas, con gran éxito. Las emisiones de gas se redujeron casi a la mitad en EE UU, y dos tercios en Europa, donde volvió a haber peces en los lagos y ríos. El azote de la lluvia ácida, sin embargo, sigue castigando partes de Rusia, China e India. ▪



Gene Likens

Tras estudiar zoología en la universidad, Gene Likens (Indiana, 1935) fue profesor asistente en Dartmouth College, en Nueva Hampshire. En 1963, junto con F. Herbert Bormann, Noye Johnson y Robert Pierce, comenzó el estudio sistemático del agua, de los minerales y de las formas de vida de la cuenca de Hubbard Brook. En 1968, estos estudios reflejaban el predominio general de la lluvia ácida, por las emisiones de las fábricas del Medio Oeste. El trabajo de años del equipo en la zona fue uno de los estudios más exhaustivos sobre cómo la contaminación del aire y el uso de la tierra pueden afectar toda una cuenca. El trabajo de Likens sobre deforestación, uso de la tierra y sostenibilidad produjo un cambio de política en el Servicio Forestal, y ayudó a definir las enmiendas a la Ley de Aire Limpio en 1990. Likens recibió la Medalla Nacional de Ciencia en 2001.

Obras principales

1985 *An ecosystem approach to aquatic ecology: Mirror Lake and its environment.*
1991 *Limnological analyses.*



UN MUNDO FINITO SOLO PUEDE MANTENER UNA POBLACION FINITA

SOBREPOBLACIÓN

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Garrett Hardin (1915–2003)

ANTES
1798 Thomas Malthus predice que el aumento poblacional agotará los alimentos a mediados del siglo XIX.

1833 En *Two lectures on the checks to population*, el economista británico William Forster Lloyd trata la sobrepoblación con el ejemplo de las tierras comunales, menos productivas si en ellas pasta demasiado ganado.

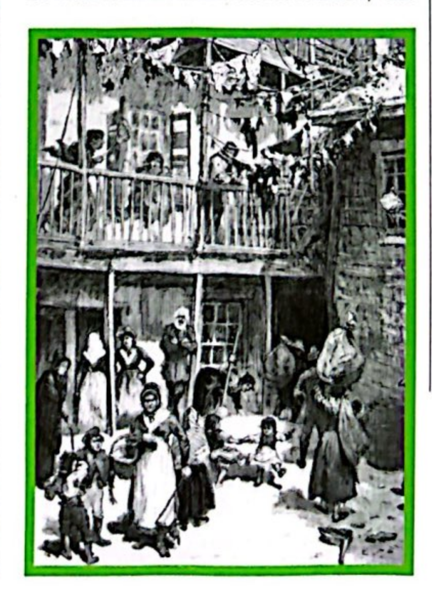
DESPUÉS
1974 Una conferencia de las Naciones Unidas en Bucarest aprueba el primer Plan de Acción Mundial sobre Población.

2013 En *Population 10 billion*, el geógrafo social británico Danny Dorling explica la improbabilidad de que la población mundial alcance esa cifra, pese a las estimaciones de las Naciones Unidas.

En 1968, dos científicos publicaron advertencias sombrías sobre la superpoblación. El ecólogo Garrett Hardin predijo que pronto se consumirían los recursos de la Tierra y aumentarían los daños al medio. En *The tragedy of the commons*, citaba ejemplos de varias grandes crisis globales causadas por la superpoblación: la destrucción de las reservas de peces por la sobrepesca; la desecación de lagos por la extracción excesiva de agua subterránea para regar cultivos; la deforestación; la contaminación atmosférica, del suelo y del mar; y la extinción de especies. Hardin proponía una solución polémica: que el gobierno retirara la ayuda económica a quienes tuvieran un número excesivo de hijos para prevenir futuros nacimientos. El biólogo Paul Ehrlich defendió también el control de la natalidad en *The population bomb*, advirtiendo que la humanidad no tardaría en alcanzar un número que causara una hambruna masiva.

Crecimiento y declive

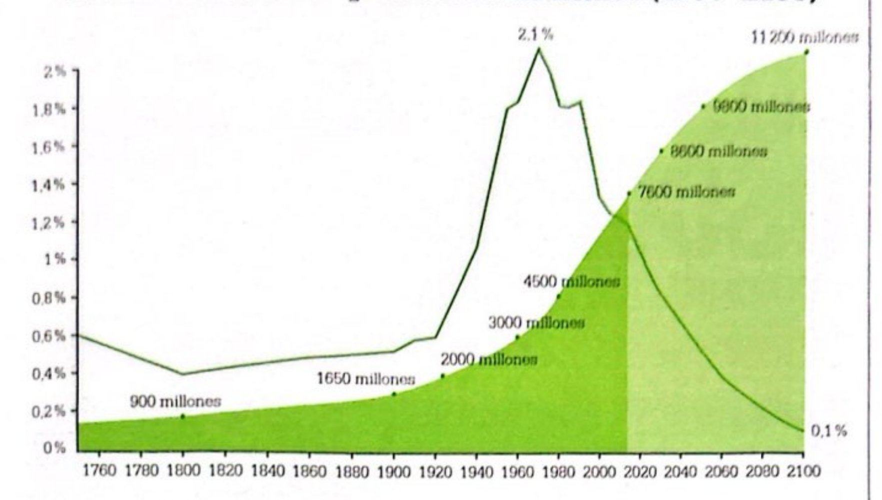
El crecimiento de la población se aceleró en Europa occidental y EE UU en los primeros años de la revolución industrial. El economista británico Thomas Malthus advirtió del hambre futura, pero sus temores fueron prematuros, al aumentar la producción de alimentos más rápidamente de lo esperado. También se redujo la esperanza de vida en las ciudades industriales por las enfermedades infecciosas; aunque se recuperó gracias a los avances médicos y una nutrición mejorada, agua más limpia y más derechos para los trabajadores. En 1924



El patio de los traperos (1879), de William Allen Rogers, muestra un barrio italiano neoyorquino de la época. El hacinamiento favorecía la difusión de enfermedades en áreas pobres.

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ La ecuación Verhulst 164–165 ▪ Agotamiento de recursos naturales 262–265 ▪ La expansión urbana 282–283

Crecimiento de la población mundial (1750–2100)



Este gráfico compara la tasa de crecimiento anual de la población mundial con los totales de población en cifras absolutas. Los datos de los años posteriores a 2017 son proyecciones.

había 2000 millones de personas en el mundo, y en 1960 eran 3000 millones, dándose la mayor parte del crecimiento en los países en desarrollo de América Latina, África y el sur y el sureste de Asia.

Frenos a la natalidad

En el siglo xx, en Europa y EE UU, el acceso generalizado a los métodos anticonceptivos, una mejor educación y la mayor presencia de mujeres en el mercado laboral redujo las tasas de natalidad, fenómeno que afecta a mujeres de todo el mundo. La población mundial superó los 4000 millones en 1974, los 5000 millones en 1987, los 6000 millones en 2000 y los 7000 millones en 2011, pero la tasa de incremento anual alcanzó el máximo a finales de la década de 1960, con un 2,5 % anual. La población sigue creciendo rápidamente en algunas partes del mundo, pero la tendencia es más lenta. La población mundial tardó solo once años en pasar de 6000 a 7000 millones, en 2011; se espera que alcance los 8000 trece años después, en 2024, y pasarán otros 25 años desde entonces hasta que llegue a los 9000. La ONU predice un pico de 11 200 millones en 2100.

Pese a la ralentización del crecimiento, aún quedan desafíos. En 2009, la ONU advertía de que habría que producir un 70 % más de alimentos en 2050 para mantener la población extra, con una presión aún mayor sobre la tierra, el agua y los recursos energéticos. Es probable que el crecimiento futuro de la población agrave muchos problemas ambientales, como la contaminación, y hará aumentar los niveles de gases de efecto invernadero, alimentando el cambio climático global. ■

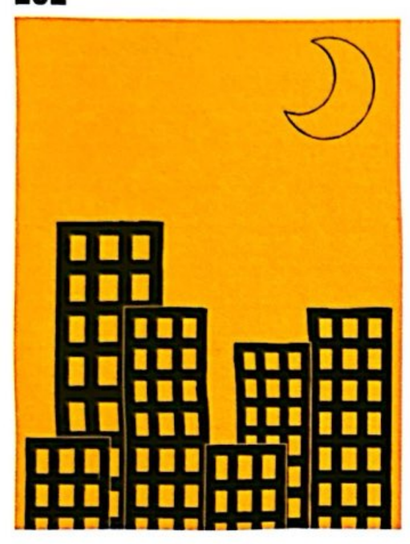
La política de hijo único en China

Hasta la década de 1960, en China se animó a las familias a tener tantos hijos como fuera posible, y la población aumentó de 540 millones, en 1949, a 940 millones, en 1976. Entonces, al gobierno le empezó a preocupar la demanda sobre los recursos. El científico y político Song Jian calculó en 1978 que la población ideal de China se encontraba entre los 650 y los 700 millones de personas, y en 1979 sus proyecciones hicieron que el gobierno limitara por ley la descendencia de las parejas a un hijo.

La política de hijo único se aplicó con más rigor en áreas urbanas que en el campo; en algunas regiones se permitía un segundo hijo si el primero era niña. Pero en las ciudades se obligó a abortar a los hijos segundos, y 21 millones de mujeres fueron sometidas a la esterilización forzosa solo en 1983. La política se relajó en 2015, pero el gobierno solo permite dos hijos por familia.



Madre e hija sonríen en este cartel de 1994 de la política de hijo único. Muchas niñas fueron abandonadas o asesinadas por sus padres para intentar tener un varón.



LA LUZ SATURA LOS CIELOS OSCUROS

CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Franz Hölker

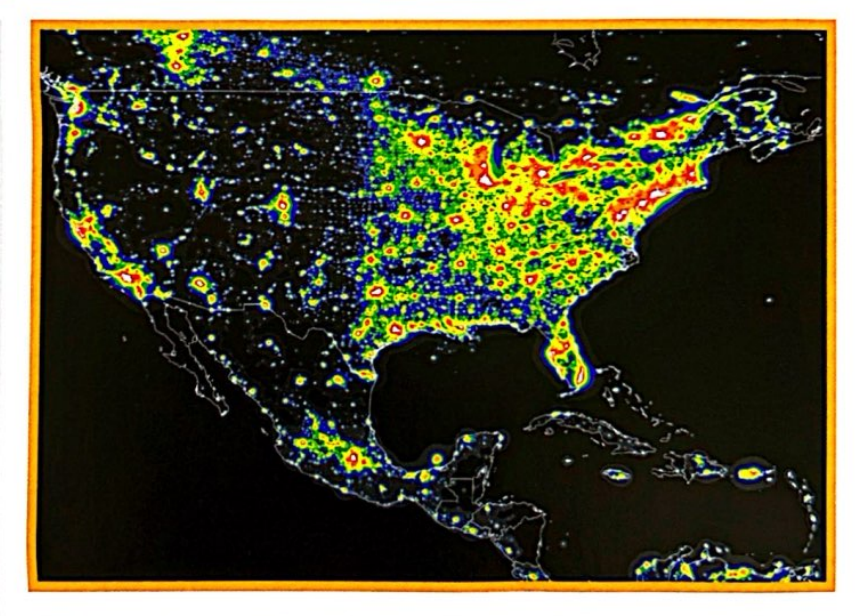
ANTES
1000 d.C. Primer sistema organizado de alumbrado (de lámparas de aceite), en la España musulmana.

1792 El ingeniero de origen escocés William Murdock inventa la luz de gas, que fue adoptada en muchas ciudades en el medio siglo siguiente.

1879 El inventor estadounidense Thomas Edison presenta la primera bombilla comercialmente viable.

1976 Se introducen las primeras luces LED, de gran brillo y eficiencia energética.

DESPUÉS
2050 Año en que Hölker y otros predicen que, con una población global mayor de 9000 millones, el área iluminada de la Tierra se habrá doblado desde 2016.



Un mapa de la contaminación lumínica en América del Norte (el blanco y rojo indican el máximo, el negro, el mínimo) explica por qué el 99 % de los estadounidenses no ve la Vía Láctea.

Según algunos ecólogos, la contaminación lumínica –la cantidad de luz generada artificialmente en el mundo– podría ser la más dañina de todas. En torno a un 80 % de la humanidad vive bajo cielos saturados de luz. En 2017, un estudio alemán dirigido por el ecólogo Franz Hölker mostraba que el área iluminada artificialmente de la Tierra había crecido un 9 % entre 2012 y 2016. El proceso alcanza la mayor intensidad en los países en desarrollo de América del Sur, África y Asia, pero sigue creciendo en los países ya bien iluminados de Europa y en EE UU.

Los astrónomos fueron de los primeros en notar la contaminación lumínica, por interferir en la observación de objetos celestes en el cielo nocturno. En 1988, los astrónomos estadounidenses Tim Hunter

Véase también: Bucles de retroalimentación ambiental 224–225 ▪ Adelanto primaveral 274–279 ▪ El Programa sobre el Hombre y la Biosfera 310–311



La oscuridad desaparece de lugares donde animales nocturnos, insectos y plantas se han adaptado a ella durante miles de millones de años.
Franz Hölker



y David Crawford fundaron la International Dark-Sky Association para proteger los cielos nocturnos de la contaminación lumínica. Era la primera organización de este tipo.

Desde entonces, diversos estudios se han ocupado de los efectos de la contaminación lumínica sobre plantas y animales, que dependen de los ciclos de luz y oscuridad para regular conductas vitales como la nutrición, el sueño, la protección de los depredadores e incluso la reproducción. Los estudios revelan muchos efectos perniciosos. Un estudio reciente ha demostrado que los árboles de Europa florecen más de una semana antes que en la década de 1990, lo cual altera su periodo de crecimiento y puede impedir que pierdan las hojas y los frutos y que entren en la fase durmiente a tiempo de evitar daños en invierno.

Círculo vicioso

La contaminación lumínica perjudica también a los animales. Las luces en torres altas, por ejemplo, atraen a las aves migratorias, que chocan con las torres y los cables de líneas de alta tensión.

La luz artificial puede dañar también el sistema inmune de las aves: se ha descubierto que los gorriones comunes infectados con el virus del Nilo Occidental portaban el virus el doble de tiempo si vivían con luz tenue que en la oscuridad, al doblarse el tiempo en que los mosquitos podían picarles y transmitir el virus.

Los efectos perjudiciales pueden tener un efecto rebote sobre las plantas. Cuando las polillas, a las que atrae la luz, acuden repetidamente a fuentes de luz artificiales, no solo pueden morir por agotamiento o por el calor generado, sino que son más vulnerables a los depredadores, que las detectan más fácilmente.

La reducción del número de polillas afecta a las plantas que estas polinizan, cuyo rendimiento en semillas se reduce. En algunos lugares, la generación de semillas se ha reducido hasta en un 30 %. Los investigadores que observaron un prado de flores en Suiza con alumbrado urbano hallaron que las visitas nocturnas de los polinizadores se redujeron en dos tercios. ■



La solución es sencilla: apagar luces innecesarias, usar solo la luz necesaria para cada tarea, y emplear siempre pantallas opacas para iluminar solamente lo necesario.
Tim Hunter



Tortugas marinas

La contaminación lumínica es un problema grave para las tortugas marinas, que tienen que poner los huevos en tierra, pues los embriones respiran a través de la concha permeable. Las hembras necesitan playas oscuras, y rehúyen las luces de los complejos turísticos, del alumbrado o de las viviendas. Si todo un tramo de costa está iluminado, pueden escoger un hábitat menos adecuado para la puesta, o poner en el mar, donde su descendencia morirá. Esto puede explicar la reducción del número de tortugas marinas. Se cree que las tortugas recién salidas del huevo se dirigen a la luz más brillante. Las tortugas acudirán hacia la luz de la luna sobre el mar en condiciones naturales, pero irán hacia el alumbrado artificial si lo hay, con el riesgo de ser aplastadas por vehículos, cazadas por algún depredador o quedar atrapadas en vallados. Entre las soluciones está lograr que los vecinos y negocios apaguen las luces de noche, o bien que utilicen luces especiales, casi invisibles para las tortugas.



Crías de tortuga golfina dirigiéndose hacia el mar, en el santuario de tortugas de Boca del Cielo, en Chiapas (México).

ESTOY LUCHANDO POR LA HUMANIDAD

DEFORESTACIÓN



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Chico Mendes (1944–1988)

ANTES
1100–1500 Se tala el bosque templado de gran parte de Europa occidental y central.

1600–1900 Se talan los bosques de América del Norte.

Finales de la década de 1970 Se acelera drásticamente la tala de la pluvisilva tropical, sobre todo para crear ranchos.

DESPUÉS
2008 La ONU lanza el programa de Reducción de Emisiones causadas por la Deforestación y la Degradación (REDD).

2010 EE UU convierte 21 millones de dólares de la deuda brasileña en un fondo para proteger la pluvisilva costera.

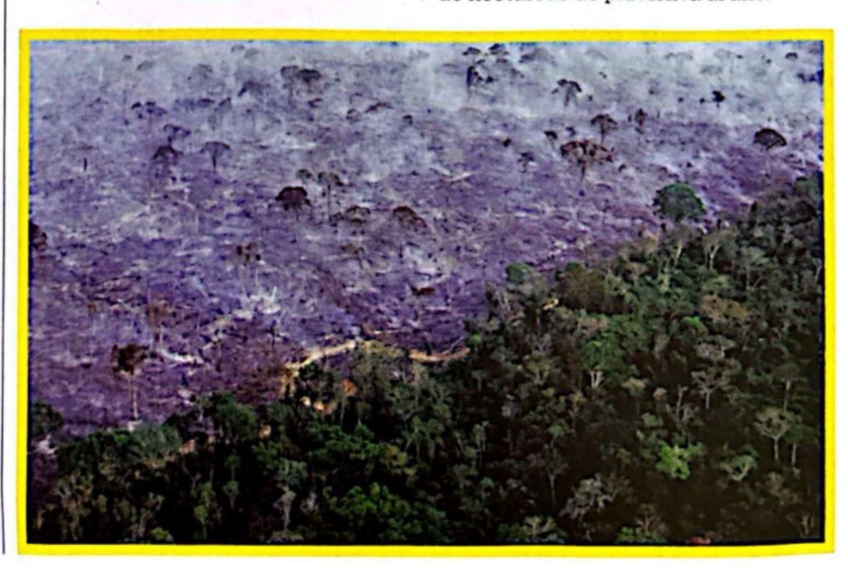
2015 El acuerdo de París, de la ONU, establece objetivos contra el cambio climático y el calentamiento global.



La deforestación es la eliminación del bosque a fin de adaptar el terreno para usos no forestales, como campos de cultivo o ranchos de ganado, o para el desarrollo en forma de viviendas, industrias o vías de transporte. Aunque no sea destruido por completo, el bosque se puede degradar al talar selectivamente árboles maduros y valiosos, como la teca, u otros árboles para construir una carretera. Esto puede tener un efecto desproporcionadamente negativo sobre la biodiversidad del bosque, aunque la mayoría de los árboles permanezcan en pie. Otra forma de deforestación se da al despejar bosque primario para sustituirlo por monocultivos, siendo el aceite de palma en Indonesia un ejemplo notorio.

La deforestación afecta a hábitats de bosque de todo tipo, pero la pluvisilva tropical –el bosque húmedo de hoja ancha que se da entre los trópicos de Cáncer y Capricornio– es la más gravemente afectada. La pre-

El humo contaminante se eleva desde la selva quemada para dejar sitio a la agricultura, en Brasil, donde se estima que se despejan 1,1 millones de hectáreas de pluvisilva al año.



Talando árboles [...] se dejan dos calamidades a las generaciones futuras: escasez de combustible y de agua.

Alexander von Humboldt
Explorador alemán del siglo XIX



Véase también: Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas 156–157 ▪ Clima y vegetación 168–169 ▪ Una perspectiva holística de la Tierra 210–211

ocupación al respecto surgió en la década de 1970, cuando el activista Chico Mendes –luego miembro fundador del Consejo Nacional de Recolectores de Caucho de Brasil– hizo llamamientos al gobierno brasileño para crear reservas forestales de las que la población local pudiera extraer de forma sostenible productos naturales tales como frutos secos, frutas y fibras. La campaña de Mendes, que iba a costarle la vida, puso de relieve el daño ecológico causado por la tala de bosques.

Necesidad humana

La humanidad se ha servido de los árboles desde sus mismos inicios. En el Neolítico se talaban para obtener combustible y para construir refugios y cercos. Se han encontrado hachas de piedra para cortar madera de hace 5000 años, así como talleres de fabricación de hachas de la misma época en Europa y América del Norte. Durante la Edad Media, al crecer rápidamente las poblaciones de Europa occidental entre 1100 y 1500, tuvo lugar una deforestación general. Los bosques se despejaban para cultivar la tierra, y la madera servía para construir viviendas y barcos, así como para fabricar arcos, herramientas y otros utensilios.

Se talaron árboles a una escala industrial en Europa central e Inglaterra para producir carbón vegetal, un combustible importante hasta su sustitución por el mineral, por arder a mayor temperatura que la leña. Hubo un ejemplo temprano de producción sostenible en Inglaterra, donde muchos bosques se gestionaban como sotos cuyos árboles se podaban para obtener un suministro cíclico de carbón, permitiéndoles crecer de nuevo. Con todo, en el siglo XVII, Inglaterra tenía que importar madera de los países bálticos y de Nueva Inglaterra para la construcción naval.

La tala del bosque primigenio se aceleró a escala global entre 1850 y 1920, con las mayores pérdidas en América del Norte, el Imperio ruso y el sureste de Asia. En el siglo XX, el foco se desplazó a los trópicos, sobre todo a la pluvisilva tropical. De esta se ha destruido la mitad desde 1947, cayendo el porcentaje de la superficie de las tierras emergidas que cubría del 14 al 6%.

Se estima que se pierde un área de bosque equivalente a 27 campos de fútbol por minuto. Algunas regiones se han visto más afectadas que otras: en Filipinas se ha despejado el 93% del bosque tropical de hoja ancha; en Brasil, el 92% del bosque atlántico; en China ha desaparecido el 92% del bosque templado de coníferas del suroeste; y se ha despejado el 90% del bosque seco de hoja ancha en California.

Efectos sobre la biodiversidad

Según estimaciones recientes, casi la mitad del bosque que se despeja se destina a la agricultura de subsistencia, y un tercio de él, a otros intereses económicos. El resto se debe al »



No podemos permanecer en silencio ante tanta injusticia.
Chico Mendes





Chico Mendes

Mendes, nacido en Brasil en 1944, hijo de uno de los 50000 miembros del «ejército del caucho», que recolectó caucho para el esfuerzo bélico aliado en la Segunda Guerra Mundial, empezó a recolectar ese látex con nueve años. Influido por la teología de la liberación, ayudó a fundar una rama del Partido de los Trabajadores, y se convirtió en líder del sindicato de recolectores de caucho.

Mientras se talaban grandes áreas de pluvisilva para la cría de ganado, Mendes hizo pública la lucha de los recolectores por salvar la selva. Viajó a Washington D.C. para convencer al Banco Mundial y al Congreso para que no financiaran nuevos ranchos. Su propuesta consistía en proteger las zonas de bosque como reservas extractivas públicas, gestionadas por parte de las comunidades locales con derecho a explotar sus productos de manera sostenible. Los ganaderos se sintieron amenazados, y uno de ellos, Darcy Alves, le mató de un disparo en 1988. Tras su muerte se estableció la primera reserva, de un millón de hectáreas de bosque en torno a Xapuri, su pueblo natal.

desarrollo urbano, la tala selectiva de maderas de calidad, la minería y cantería y la tala para leña. El medio sufre en todos los casos, y la biodiversidad en particular, pues es muy limitado el número de especies de mamíferos, aves e invertebrados que puede vivir en la pradera o en una plantación de palma aceitera, y menor aún el de especies capaces de habitar entornos industriales o urbanos. También los conflictos humanos destruyen bosques: el peor ejemplo fue el uso del Agente Naranja como herbicida defoliante en la guerra de Vietnam.

La pluvisilva

La destrucción de la pluvisilva supone una amenaza grave para la biodiversidad global, ya que se estima que en este hábitat vive entre la mitad y dos tercios de las plantas y animales del mundo. Se han identificado entre



Yo era ecologista mucho antes de haber oído la palabra siquiera.
Chico Mendes

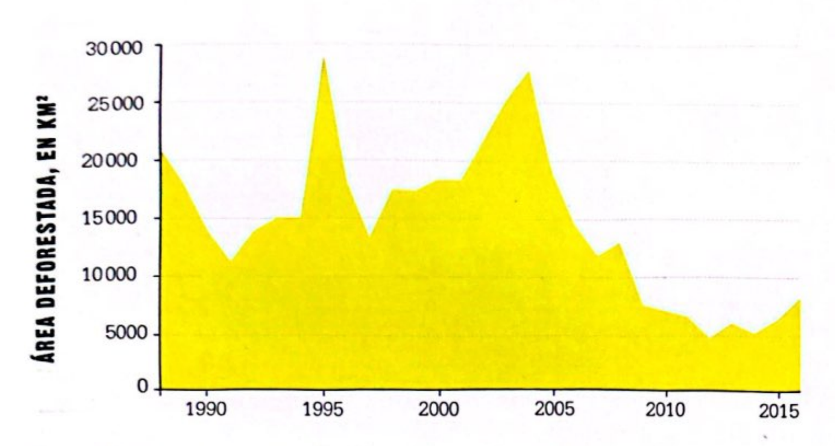


1,5 y 1,8 millones de especies –en su mayoría insectos, seguidos de plantas e invertebrados– en las pluvisilvas, y faltan aún otras muchas por descubrir y describir. En Borneo (Indonesia), por ejemplo, un área de solo 0,5 km^2 puede contener más especies de árboles que la superficie combinada de Europa y América del Norte. Esta biodiversidad es de importancia vital para los seres humanos, y no solo porque la mayoría de los nuevos medicamentos proceda de plantas, lo cual hace que la erradicación de la pluvisilva destruya curas potenciales para enfermedades.

Las pluvisilvas, junto con todos los demás bosques y árboles, actúan como una esponja de las precipitaciones. Al absorber humedad, las raíces limitan la cantidad de agua que discurre por la superficie. Cuando se quema el bosque o se tala, el suelo pierde muchos de sus nutrientes, y si está en una superficie inclinada, se perderá el propio suelo y no podrá crecer planta alguna. Los barrancos profundos pueden socavar árboles que se han salvado de la tala, y las lluvias fuertes pueden causar flujos de lodo catastróficos, cada vez más frecuentes, que lo destruyen todo a su paso, asentamientos humanos incluidos. En mayo de 2014, por ejemplo, las lluvias en las laderas deforestadas de la isla La Española, en el Caribe, causaron avalanchas de barro e inundaciones que mataron a más de dos mil personas. Durante periodos secos prolongados, en cambio, el suelo expuesto se seca antes que las áreas arboladas, y es más vulnerable a la erosión eólica.

Sustituir árboles por asentamientos humanos desestabiliza el suelo de las laderas, lo cual produce catastróficas avalanchas de lodo, como esta en Sierra Leona, en 2017.

Deforestación en el Amazonas brasileño



La cubierta menguante de pluvisilva de la cuenca del Amazonas es un problema global. En la actualidad se está despejando a un ritmo de 8000 km² anuales.

Avivando el calentamiento global

Quemar madera o bosques añade dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. Las plantas vivas de todas clases, en cambio, reducen el CO_2 al absorber el gas de efecto invernadero durante la fotosíntesis, contrarrestando así el impacto dañino de la actividad humana. A escala global, los bosques absorben 2400 millones de toneladas de CO_2 al año. A ecologistas y climatólogos les preocupa el desastre que puede causar la eliminación de grandes extensiones de bosque tropical.

Reforestar la Tierra

Actualmente, un 31 % de la superficie emergida de la Tierra está cubierta de bosques, pero la cifra no deja de menguar en algunas partes del mundo. Hay regiones, sin embargo, como Europa, donde el área de bosque se está expandiendo de forma gradual. Entre otras medidas para restringir la deforestación, las comunidades reciben fondos públicos para conservar el bosque y crear reservas extractivas en las que la población local puede cosechar productos de forma sostenible.

Desde un punto de vista global, es necesario encontrar fuentes alternativas de combustible, así como nuevas maneras de desarrollar tipos de agricultura menos dependientes del suelo. Algunas naciones han asumido el liderazgo en programas de reforestación. Por ejemplo, en la costa de Senegal hay un proyecto en marcha en el que la población de quinientas aldeas ha plantado 150 millones de mangles, restaurando el manglar en beneficio de la pesca y protegiendo los arrozales del influjo de agua salada. En China se fijó como objetivo repoblar 6,6 millones de hectáreas en 2018, un área equivalente a la de Irlanda; en 2000, la proporción de China cubierta de bosque había caído al 19 %, pero se pretende llegar al 20 % en 2020 y al 26 % en 2035. ■

Reforestar el Amazonas

En torno a un 17 % de la selva amazónica se ha perdido desde mediados de la década de 1970. En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, en 2015, Brasil se comprometió a repoblar 12 millones de hectáreas antes de 2030. En 2017, Conservation International, en colaboración con el gobierno brasileño, puso en marcha el mayor programa de reforestación en la zona hasta la fecha actual, que añadirá 73 millones de árboles por siembra y trasplante.

Las comunidades locales participan en la realización del programa por medio de la *muvuca*, consistente en sembrar semillas de más de doscientas especies nativas en cada metro cuadrado de tierra. Requiere mucha menos mano de obra que el trasplante de brotes, y reforesta rápidamente la tierra, con un rendimiento de 2500 plantas por hectárea. Además de la siembra, también se trasplantarán árboles con el fin de enriquecer el bosque secundario y reconvertir pastos en bosque.



La primera mujer africana en recibir el Premio Nobel de la Paz (2004), Wangari Maathai, inició un programa comunitario de replantación para combatir la erosión y la desertificación en Kenia.



EL AGUJERO DE LA CAPA DE OZONO ES COMO UNA MARCA ESCRITA EN EL CIELO

LA REDUCCIÓN DEL OZONO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Joseph Farman (1930–2013)

ANTES
1974 Frank «Sherry» Rowland y Mario Molina sostienen que los clorofluorocarbonos (CFC) destruyen el ozono atmosférico.

1976 La Academia Nacional de Ciencias de EE UU declara que la pérdida del ozono es una realidad.

DESPUÉS
1987 Se negocia el Protocolo de Montreal para la protección de la capa de ozono, tratado global para eliminar de forma gradual CFC y sustancias similares.

1989 Entra en vigor la prohibición mundial de producir CFC (ratificada por la UE y 196 estados hasta hoy).

2050 El año en que se predice que el ozono antártico volverá a los niveles anteriores a 1980; otras emisiones dañinas podrían retrasarlo.

En 1982, un equipo de científicos que trabajaban para el British Antarctic Survey (BAS) descubrió la caída drástica de los niveles de ozono sobre la Antártida. El ozono (O_3, un gas incoloro, presente en la estratosfera a entre 20 y 30 km de altura sobre la superficie terrestre) forma una capa protectora que absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta (UV) del Sol. Sin dicha capa, más radiación dañina llegaría a la superficie.

Desde mediados de la década de 1970, la cantidad de ozono en la estratosfera se ha reducido un 4%. Una caída aún mayor se observa en los polos, sobre todo en primavera. Sobre la Antártida, el ozono medido se ha reducido un 70% desde 1975. Sobre el Ártico, la caída es de casi el 30%. Se habla de «agujero del ozono», pero sería más apropiado decir «depresión del ozono», por tratarse de un adelgazamiento de la capa, más que de un agujero propiamente dicho.



Joe Farman [realizó] uno de los descubrimientos geofísicos más importantes del siglo XX.
John Pyle y Neil Harris
Científicos atmosféricos de la Universidad de Cambridge



Descubrimiento antártico

El geofísico británico Joe Farman era miembro del equipo que realizó el descubrimiento en 1982. Los equipos del BAS llevaban registrando datos atmosféricos en la base Halley de la Antártida desde 1957. La financiación era escasa, y dependían de instrumentos anticuados como el espectrofotómetro Dobson, una máquina rudimentaria que solo funcionaba bien envuelta en un edredón.

Al percatarse de la caída de los niveles de ozono, a Farman le costó creerlo, y pensó que algo fallaba en el espectrofotómetro. Encargó uno nuevo para el año siguiente, que reflejó una caída aún mayor, y al año siguiente volvió a ocurrir lo mismo.

Un año después, el equipo hizo las mediciones a 1000 km de la base, y de nuevo se registró una gran reducción. Farman decidió que había llegado el momento de publicar el hecho, y

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Bucles de retroalimentación ambiental 224–225 ▪ La curva de Keeling 240–241 ▪ Ética ambiental 306–307

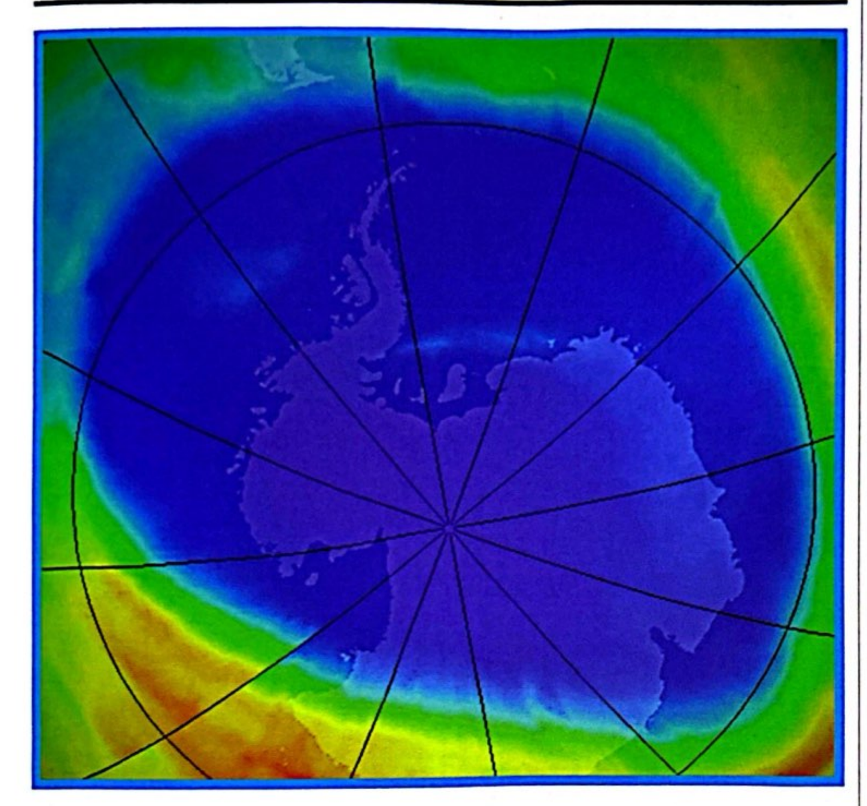


Imagen de la NASA del «agujero» del ozono sobre la Antártida en 2014. El área azul indica la menor cantidad de ozono, que se ha estabilizado en la estratosfera desde aproximadamente 2000.

un trabajo escrito por él y sus colegas Brian Gardiner y Jon Shanklin apareció en la revista *Nature* en 1985.

Reacción y respuesta

La mayoría de los científicos recibieron el descubrimiento de Farman con alarma: el aumento potencial de la radiación ultravioleta dispararía la incidencia del cáncer de piel, las cataratas y las quemaduras de sol.

¿Qué hacer? Una de las causas de la reducción del ozono la habían identificado los científicos estadounidenses Frank Rowland y Mario Molina, quienes concluyeron que los gases que contienen cloro –entre ellos los clorofluorocarbonos (CFC) presentes en las latas de aerosol y refrigerantes halógenos–, en presencia de luz ultravioleta, reaccionaban con el ozono de la estratosfera, descomponiéndolo. Algunos países, entre ellos EE UU, prohibieron el uso de estos productos, pero aún quedaba por convencer a la mayoría.

Los niveles de ozono siguieron cayendo a lo largo de la década de 1980, y la opinión fue cambiando gradualmente. En 1987 se acordó el Protocolo de Montreal para una prohibición global. La capa de ozono muestra signos de recuperación, y se espera que en 2075 el ozono estratosférico haya regresado a los niveles de 1975. ■

Los CFC

Los clorofluorocarbonos (CFC), sustancias hechas de átomos de carbono, cloro y flúor, no son ni tóxicos ni inflamables, y sí extremadamente estables. La baja reactividad que los hacía tan útiles es también la causa de que sean tan destructivos. Duran más de cien años, tiempo suficiente para llegar a la estratosfera, donde los descompone la luz ultravioleta liberando cloro, que reacciona con el ozono y forma oxígeno.

Los CFC se produjeron por primera vez en 1928, y se usaron como refrigerante en neveras. Luego sirvieron para una gama amplia de aerosoles, como acondicionadores, pintura en espray o insecticidas.

Los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) –que también dañan la capa de ozono, aunque en mucha menor medida–, y los hidrofluorocarbonos (HFC) fueron los sustitutos de los CFC. Los HCFC dejarán de usarse en 2020. Los HFC no dañan en absoluto la capa de ozono, pero son gases de potente efecto invernadero, por lo cual se acordó en 2016 dejar de usarlos gradualmente a partir de 2019.



Aerosoles como los repelentes de insectos fueron muy comunes desde la década de 1950. El daño que causaban los CFC no se conoció hasta la década de 1970.

NECESITABAMOS UN MANDATO PARA EL CAMBIO

AGOTAMIENTO DE RECURSOS NATURALES



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Naomi Klein (n. 1970)

ANTES
1972 La Conferencia de la ONU sobre el Medio Ambiente Humano pide un enfoque internacional de la protección ambiental.

1980 La Estrategia Mundial para la Conservación, lanzada en 35 países, introduce el concepto de sostenibilidad.

1992 En la Cumbre de la Tierra de la ONU en Río de Janeiro se acuerda el Programa 21, con planes para la gestión de los recursos en el siglo XXI.

DESPUÉS
2015 La Cumbre de Desarrollo Sostenible de la ONU fija 17 metas sostenibles y lanza un programa global que adoptan 193 estados miembros.

En *Esto lo cambia todo* (2014), la canadiense Naomi Klein atacaba el modo en que gobiernos y empresas agotan los recursos naturales. «Petróleo ético» es, mantiene Klein, además de una contradicción en sí misma, una atrocidad. Klein ha hecho campaña contra la explotación de las arenas de alquitrán de Athabasca, el mayor de tres grandes depósitos de estas arenas bituminosas en el oeste de Canadá. Los depósitos están debajo de miles de kilómetros cuadrados de bosque de coníferas. La explotación a cielo abierto del bitumen de los depósitos es especialmente dañina para el medio. Se despejan grandes superficies de bosque, y se dejan estanques de productos contaminantes que se

Véase también: Deforestación 254–259 ▪ Sobrepesca 266–269 ▪ El dominio de la naturaleza por la humanidad 296 ▪ Devastación humana de la Tierra 299



Extraer bitumen de las arenas aceiteras (o de alquitrán) de Canadá es muy dañino para el medio, y causa el 10 % de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero del país.

filtran al suelo, los ríos y las aguas subterráneas, envenenando a peces, aves migratorias y otros animales.

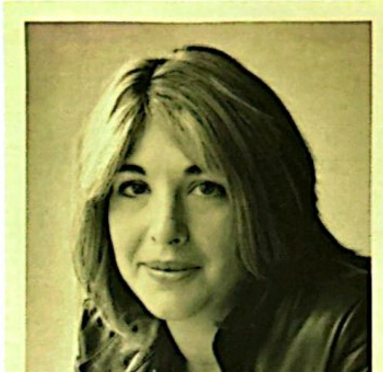
Acción global

En la década de 1980 eran alarmantes los efectos ambientales de la industrialización y del agotamiento de los recursos naturales. Las Naciones Unidas crearon una Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, que publicó el informe «Nuestro Futuro Común» en 1987. Los expertos participantes, entre ellos, científicos, agrónomos, ministros de asuntos exteriores, tecnólogos y economistas, dejaron claro que el futuro de la humanidad depende de equilibrar ecología y economía de modo sostenible y justo para todas las naciones del mundo. Las áreas clave del esfuerzo por una gestión sostenible de la Tierra son los combustibles fósiles, la deforestación y la gestión del agua.

En 1992, en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, 172 países firmaron acuerdos ambientales, entre ellos el Programa 21, que propicia que los gobiernos trabajen juntos en la protección de los recursos naturales y el medio ambiente. Lograr cambios ha resultado difícil, sin embargo, y en las cumbres de la Tierra posteriores ha habido llamamientos a una mejor cooperación internacional para cumplir los objetivos fijados.

Pico del petróleo

Los combustibles fósiles están entre los recursos más valorados del mundo. La sociedad se ha vuelto cada vez más dependiente del petróleo, que se derrocha para mantener un estilo de vida en último término insostenible. Las crisis del petróleo de la década de 1970 pusieron de manifiesto la dependencia de las naciones »



Naomi Klein

Nacida en Montreal (Canadá) en 1970, de padres activos políticamente, Klein desarrolló ya de joven una perspectiva cabal de cómo funciona el mundo. Su primer empleo fue en el periódico *The Globe and Mail* de Toronto. Su primer libro, *No Logo: el poder de las marcas*, una crítica de la globalización y la codicia empresarial, fue un éxito. *La doctrina del shock*, su segundo libro, atacaba al neoliberalismo. Klein hizo campaña contra la prioridad de los intereses de las empresas sobre los de la humanidad y el medio ambiente. De su libro *Esto lo cambia todo* se hizo una película. Klein protestó contra la construcción del oleoducto Keystone XL, un símbolo de la batalla contra los combustibles fósiles y el cambio climático. En noviembre de 2016 recibió el Sydney Peace Prize de Australia.

Obras principales

2000 *No Logo.*
2007 *La doctrina del shock: el auge del capitalismo del desastre.*
2014 *Esto lo cambia todo: el capitalismo contra el clima.*



[…] la conservación de los recursos naturales es un problema fundamental. Si no lo resolvemos, de poco servirá resolver todos los demás.

Theodore Roosevelt



industrializadas de un suministro económicamente viable, y con ello se extendió la conciencia de que el petróleo es un recurso finito. Los científicos habían considerado ya el problema, y calculado la fecha en la que se alcanzaría el pico del suministro, antes de que se agotara o resultara demasiado caro extraerlo. En 1974 se creía que la fecha sería 1995, con la precaución de que había variables potenciales y aspectos desconocidos tales como las tasas de consumo, la tecnología disponible y reservas aún por descubrir. A inicios del siglo XXI se hicieron proyecciones nuevas, algunas de las cuales llegaban hasta 2030 o más allá. En 2011, sin embargo, el ambientalista estadounidense Bill McKibben declaró que calcular el pico de suministro del petróleo no tiene sentido: si se consumen todas las reservas conocidas, se producirá cinco veces la cantidad de dióxido de carbono necesaria para aumentar la temperatura del planeta 2 °C, el límite de temperatura «seguro» que calcularon los climatólogos en 2009. La ciencia ha progresado, pero los riesgos asociados al uso de los combustibles fósiles siguen siendo graves.

Salvar los árboles

Los bosques son un activo natural que la Tierra no puede permitirse perder, y su reducción es una amenaza importante para el clima: los árboles son «sumideros de CO_2», por consumir dióxido de carbono para crecer. Los árboles son un recurso renovable, y las personas, las empresas y los países los plantan para compensar el uso de combustibles fósiles, pero no en número suficiente. Según Amigos de la Tierra, la pérdida anual de bosques en todo el mundo causa directamente el 15 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

Las pluvisilvas, que se estima contienen el 50 % de las especies de árboles del mundo, son muy vulnerables a la deforestación: en los últimos 50 años se ha perdido un 17 % de la selva del Amazonas. Como reflejaba el informe «Nuestro Futuro Común», parte del problema es que los países en vías de desarrollo obtienen dinero de las grandes empresas a cambio de despejar bosques para la minería, la industria maderera y la agricultura de mercado. En Indonesia, por ejemplo, se practicó una deforestación intensiva para cultivar aceite de palma. Greenpeace informa de que la extensión de pluvisilva talada, quemada o degradada en los últimos 50 años es el doble de la superficie de Alemania. La ONU y otros organismos ofrecen hoy asesoramiento técnico e incentivos financieros a los países en desarrollo para gestionar sus bosques de modo más sostenible.

Suelo deteriorado

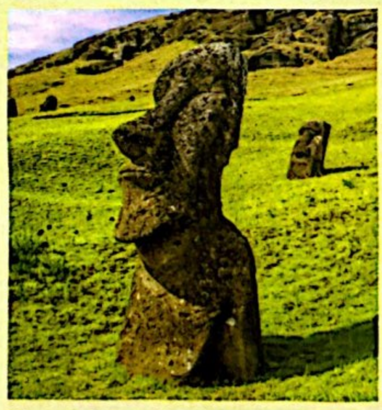
El suelo es quizá uno de los recursos menos valorados del mundo. Este vasto ecosistema compuesto de ani-

Isla de Pascua

El destino que sufrieron los antiguos habitantes de la isla de Pascua, o Rapa Nui, ilustra la importancia de la gestión de los recursos naturales. Una comunidad próspera de 12 000 habitantes que erigía enormes monumentos de piedra había quedado reducida a un par de miles de personas en 1722, año en que los europeos descubrieron la isla.

La mala gestión de un ecosistema frágil, sobre todo la deforestación masiva, y las guerras entre tribus fueron la causa de la decadencia. Para transportar rodando los grandes moái de piedra de las canteras a los lugares ceremoniales, hacían falta troncos, y tras talar todas las abundantes palmeras de la isla, no quedó madera para hacer canoas y salir a pescar. Muchos pascuenses murieron de hambre.

La tragedia fue rematada en 1862 con la llegada de los comerciantes de esclavos: capturaron a 1500 isleños y los llevaron a Perú, donde murieron casi todos. Los quince isleños que lograron regresar portaban la viruela, y en 1877 solamente quedaban 111 habitantes.



Unos 887 moái cubren la ladera de Rano Raraku, el cráter volcánico de la isla de Pascua del que se obtenía la piedra para tallar las estatuas.



Los bosques densos como el de este cuadro del siglo xv, del pintor italiano Paolo Uccello, están volviendo a Europa, donde han ganado 17 millones de hectáreas desde la década de 1990.

males, microbios, raíces de plantas y minerales es una estructura compleja y delicada que tarda en formarse y se pierde fácilmente. El Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Fund, WWF) estima que se ha erosionado la mitad del suelo del mundo por efecto del viento y la lluvia en los últimos 150 años. Las partículas se acumulan en las corrientes de agua, las cuales ciegan con sedimento. La pérdida de suelo se debe al sobrepastoreo, a la retirada de setos y al uso de sustancias agroquímicas que afectan a su estructura. Medidas como el barbecho, los bancales, las presas y plantar de forma estratégica pueden ser útiles. En el pueblo de Aamdanda, en Nepal, por ejemplo, las laderas empinadas se estabilizan plantando *Thysalonaena latifolia*, que da cohesión al suelo, sirve como forraje y se usa para hacer escobas, que luego vende la población local.

Presiones del agua

El agua potable es un recurso limitado. Cubre un 75 % de la superficie terrestre, pero el 97 % es agua salada. Del 2,5 % restante, la mayor parte está atrapada en glaciares o acuíferos subterráneos profundos. Solo la centésima parte del 1 % del agua del mundo está directamente disponible para uso humano. La distribución del agua potable es, además, desigual, siendo más escasa en las zonas tórridas y secas que en las templadas.

Las presiones de la población y la riqueza afectan también al suministro. Según la ONU, todo el mundo debería tener acceso a al menos 50 litros de agua fresca diarios, pero en el África subsahariana deben conformarse con 10 litros, mientras que el estadounidense medio cuenta con 350 litros.

Por todo el mundo, las reservas de agua están siendo compradas por grandes empresas. Algunos científicos advierten de que, con las tendencias actuales de uso del agua y crecimiento de la población, en 2030 la demanda global de agua limpia superará a la disponibilidad en un 40 %.

Planes de futuro

Es evidente que hacen falta nuevas estrategias para salvar el mundo de la destrucción humana. El campo multidisciplinar emergente de la ingeniería de transición podría resultar útil, al valerse de las empresas, organizaciones y sistemas existentes para encontrar maneras innovadoras de minimizar los impactos ambientales y gestionar los recursos.

Ha habido progresos, en parte gracias a los esfuerzos de activistas como Naomi Klein. Varios países europeos y asiáticos han decidido eliminar progresivamente los vehículos a base de combustibles fósiles. En otros lugares, sigue habiendo obstáculos socioeconómicos y políticos a la reforma. Como decía el informe «Nuestro Futuro Común», cumplir responsablemente las metas y aspiraciones de la humanidad requerirá el apoyo activo de todos. ■



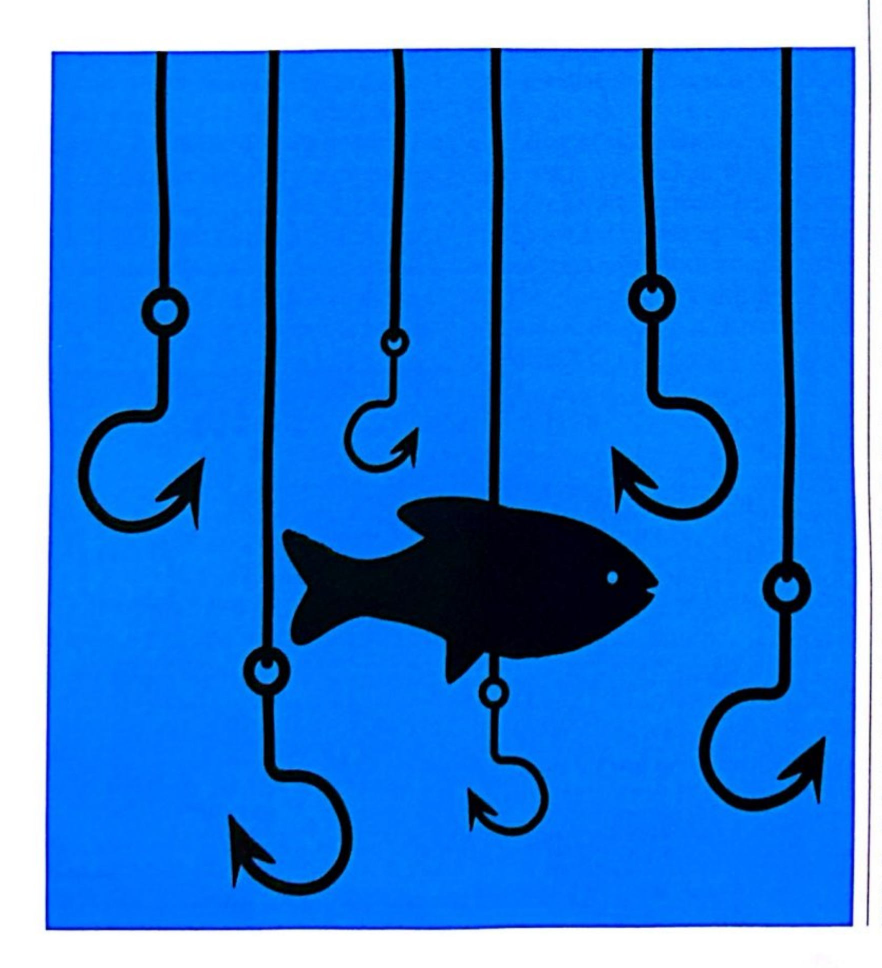
Hay que pensar en términos de la supervivencia de la sociedad humana [...], no se trata solo de la magnitud del cambio, sino de su rapidez.

Benjamin Horton
Geógrafo británico



BARCOS CADA VEZ MAYORES PARA PECES MENORES Y MAS ESCASOS

SOBREPESCA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
John Crosbie (n. 1931)

ANTES
1946 Se funda la Comisión Ballenera Internacional para revisar y controlar la actividad y revertir la drástica reducción tras siglos de caza.

1972 La sobrepesca y El Niño causan el desplome de la pesca de la anchoveta en Perú, un golpe para la economía nacional.

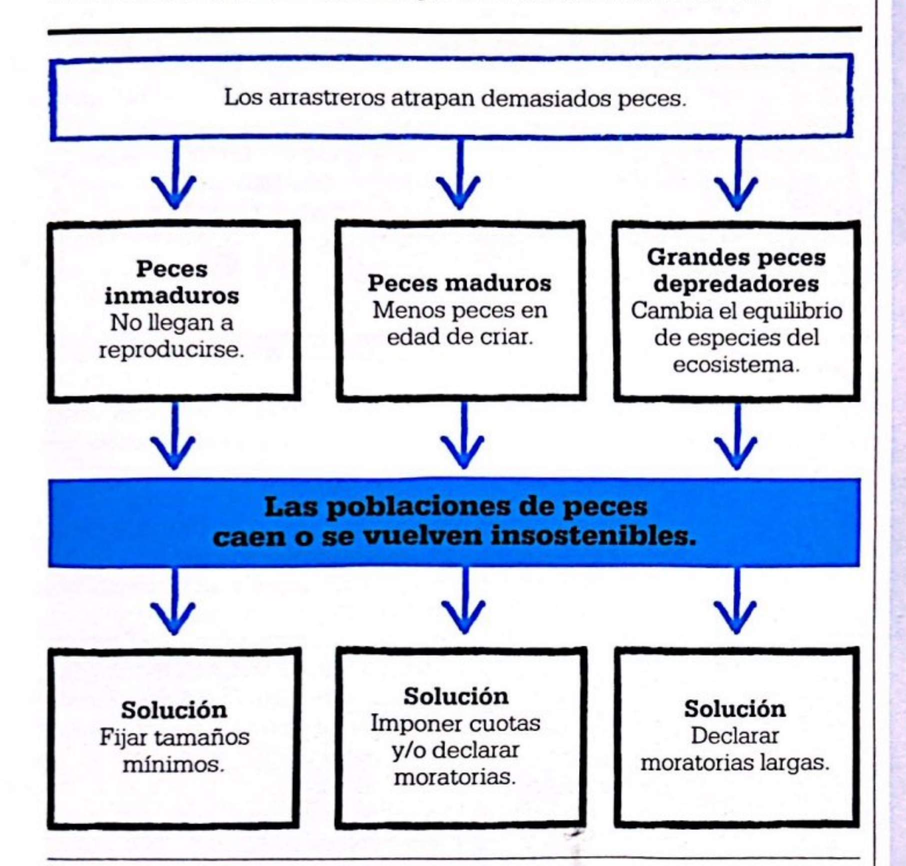
DESPUÉS
2000 El WWF incluye el bacalao en la lista de especies amenazadas, y lanza una campaña para la recuperación de los océanos en Reino Unido.

2001 Jeremy Jackson y otros biólogos marinos rastrean la historia de la sobrepesca.

2010 La Meta Aichi 11 para la Biodiversidad pide proteger el 10 % de las zonas costeras y marinas en 2020.

En 1992, la nueva legislación cambió la estructura ecológica, socioeconómica y cultural de las Provincias Marítimas (atlánticas) de Canadá. John Crosbie, ministro federal de Pesca y Océanos, declaró una moratoria de la pesca del bacalao atlántico. La medida era necesaria, ya que el volumen de las capturas se había reducido al 1 % de los niveles anteriores. La sobrepesca había llegado a tal punto que la recuperación sería imposible si se permitía continuar pescando. Crosbie dijo que era el momento más duro de su carrera política, pues la decisión suponía la pérdida de miles de puestos de trabajo. La pesca del bacalao había sido el sustento de la

Véase también: Una perspectiva holística de la Tierra 210–211 ▪ Devastación humana de la Tierra 299 ▪ Iniciativa por una biosfera sostenible 322–323



población de la costa desde hacía 500 años, sobre todo en Terranova.

La moratoria de 1992 estaba prevista en principio para dos años, pero sigue vigente en gran medida, al no haberse recuperado las poblaciones. Entre 2005 y 2015, el volumen de bacalao creció un 30 % anual en la costa nordeste de Terranova, pero la recuperación no fue tan rápida en el sur. En 2017 y 2018, sin embargo, hubo una caída marcada, y en general las reservas son insuficientes para la pesca a gran escala. El cambio climático ha contribuido al problema: las temperaturas más altas crean condiciones en las que el bacalao y sus fuentes de alimento tienen dificultades para sobrevivir.

Otro golpe para los pescadores de Terranova –que en gran parte se dedicaron a pescar gambas y cangrejos– fue que, allá donde se recuperaban las poblaciones de bacalao, este pez se alimentaba de gambas. El ecosistema no podía mantener a la vez dos industrias a gran escala, una de crustáceos y otra bacaladera.

Capturas sostenibles

El problema de Terranova muestra la complejidad de la gestión pesquera, en la que suele manejarse el concepto de rendimiento máximo sostenible: el volumen de pescado extraído del mar debería seguir al volumen repuesto por la reproducción. Esto se suele lograr por medio de cuotas, »

Reservas marinas

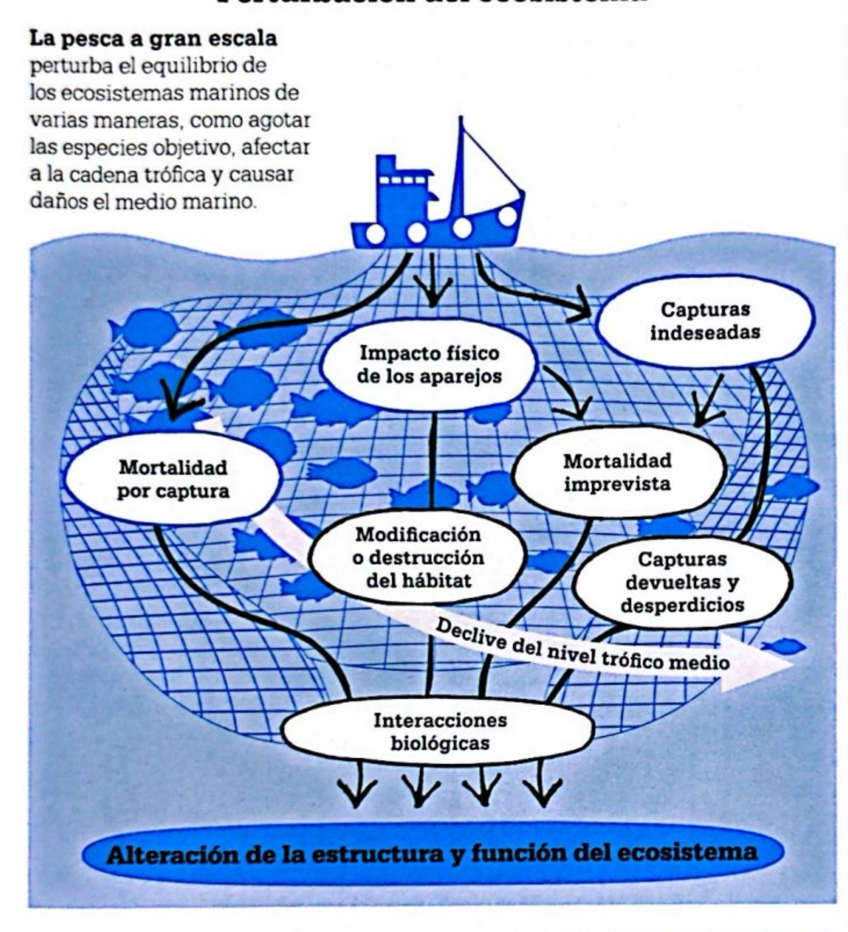
Una herramienta prometedora para la gestión de la pesca es la creación de áreas marinas protegidas, en las que las poblaciones de peces y los ecosistemas son objeto de protección legal. Representan el 3,5 % de los océanos del mundo, pero solo el 1,6 % son parques marinos donde está prohibida la pesca, la extracción de materiales, los vertidos, las perforaciones y el dragado. Un estudio mostró que el volumen de las diversas especies es, de media, un 670 % mayor en los parques plenamente protegidos que en las áreas marinas sin protección. Los parques protegen y restauran los ecosistemas dañados: los arrecifes de coral de las zonas protegidas se recuperaron de un fenómeno de El Niño antes de una década, pero no ocurrió así con los de las áreas no protegidas. Algunos estudios apuntan a que las reservas protegidas pueden ayudar a recuperar las poblaciones fuera de sus límites.



El jurel plateado es una de las muchas especies del Santuario de Fauna y Flora Malpelo, la mayor área protegida del Pacífico oriental tropical, famosa por sus tiburones.

Perturbación del ecosistema

La pesca a gran escala perturba el equilibrio de los ecosistemas marinos de varias maneras, como agotar las especies objetivo, afectar a la cadena trófica y causar daños el medio marino.



que limitan el número de peces que se pueden capturar en cada temporada. Las cuotas pueden corregir la pesca insostenible: el 16 % de las poblaciones de peces fueron objeto de sobrepesca en 2015, comparado con el 20 % en 2000. El sistema de cuotas, sin embargo, anima a los pescadores a concentrarse en los peces más grandes posibles, y devolver al mar a los más pequeños, que suelen morir en la operación. En muchos casos, las cuotas no están fijadas en un límite verdaderamente sostenible. La pesca comercial tiene un poder de presión considerable, y tiende a buscar el beneficio económico a corto plazo en lugar de la sostenibilidad a largo. La gestión de la pesca se complica aún más por factores como el propio carácter abierto del océano, la pesca ilegal, la falta de normativa o la negligencia.

Una crisis mundial

Con más del 30 % de las pesquerías del mundo explotadas más allá de sus límites biológicos, y con el 90 % de las poblaciones de peces objeto de pesca al límite o en sobrepesca, este es hoy un problema global. La gestión sostenible es fundamental para que la pesca siga dando trabajo y satisfaga la demanda de los consumidores.

Las estrategias de gestión a adoptar dependen de la naturaleza del problema: si se capturan peces que no han alcanzado la madurez, se limita la capacidad reproductiva futura y la población de una especie, y establecer tamaños mínimos ayuda a controlar este tipo de sobrepesca; si se capturan demasiados ejemplares maduros, podrían quedar muy pocos para reproducirse y restablecer la población previa, y en este caso son útiles las moratorias y las cuotas, entre otras medidas. Por último, puede ocurrir que la reducción del número de una especie llegue a tal punto que el propio ecosistema cambie, y no pueda ya mantener esa población en un nivel sostenible. Esto suele ocurrir cuando hay sobrepesca de especies grandes de peces depredadores, lo cual permite a las poblaciones de las especies pequeñas aumentar hasta alterar todo el ecosistema. Así ocurrió en el Atlántico Norte con la pesca del bacalao: sin depredadores que los limitaran, las tres principales presas del bacalao, esto es, las gambas, los cangrejos y los capelanes, aumentaron en número.

El problema de la sobrepesca lo complican el cambio climático y la contaminación, que afectan también a los ecosistemas oceánicos. Las consecuencias podrían ser graves: si el calentamiento global continúa, aumentarán las temperaturas oceánicas, se fundirá más hielo marino,



No fui yo quien sacó los peces del condenado mar.
John Crosbie



y cambiarán las corrientes eólicas y oceánicas. Como resultado, los nutrientes de las aguas superficiales se desplazarán a las profundidades, matando de hambre los ecosistemas oceánicos y reduciendo la fotosíntesis del fitoplancton, la base misma de la cadena trófica oceánica. Antes de tres siglos, las pesquerías del mundo podrían ser un 20 % menos productivas, y entre un 50 y un 60 % menos en el Atlántico Norte y el Pacífico occidental. Estas predicciones, realizadas por científicos de la Universidad de California en Irvine, se basan en un calentamiento global extremo de 9,6 °C, pero los modelos muestran que esta es una posibilidad.

Encontrar nuevas soluciones

El consumo de pescado y marisco ha aumentado de 9,9 kg anuales per cápita en la década de 1960 hasta los más de 20 kg en 2016. Se predice que la demanda global alcanzará unos 236 millones de toneladas en 2030. La acuicultura o cría de pescado y marisco ha empezado a satisfacer gran parte de la demanda, y tiene el potencial de reducir la presión sobre las poblaciones salvajes, pero trae consigo problemas propios. Los nutrientes y sólidos añadidos al agua en las explotaciones en mar abierto pueden degradar el medio, y la acumulación de materia orgánica puede cambiar la química de los sedimentos, lo cual afecta al agua de los alrededores. Los peces pueden escapar, introduciéndose así especies o enfermedades ajenas en otros medios de agua dulce o salada.

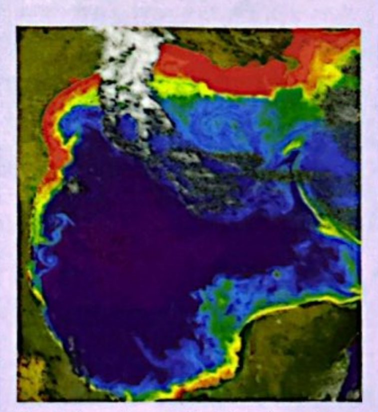
Mientras la acuicultura ayuda a satisfacer la demanda, la sobrepesca sigue planteando graves peligros para la salud de los ecosistemas marinos del mundo y para el futuro económico de muchos países. La moratoria canadiense supuso un trauma severo para la economía y la cultura de Terranova y las provincias marítimas vecinas. Para evitar tales crisis, un número mayor de gobiernos deberá desarrollar métodos de pesca sostenibles y proteger la salud de los ecosistemas y las poblaciones acuáticas. ■



Una jaula para salmones construida en China comienza su viaje hasta Noruega. Esta plataforma piscícola sumergible está diseñada para criar un millón y medio de salmones al año.

Efectos de la contaminación

Hay dos tipos principales de contaminación que dañan los ecosistemas marinos. Los fertilizantes arrastrados por la lluvia, que suelen contener nitrógeno y fósforo, producen proliferaciones de algas o fitoplancton, que después mueren. Al descomponerse consumen oxígeno, creando una zona muerta en el agua que no puede mantener vida alguna. Los peces deben irse o morir, y los alevines que viven cerca de la costa antes de salir a mar abierto corren el mayor riesgo. En 2017, la zona muerta anual del golfo de México ocupaba una superficie de 22 000 km². Otra amenaza es la contaminación por plástico, pues los peces lo ingieren, o quedan atrapados entre las redes o desechos. Se estima que hay más de 5 billones de trozos de plástico en el océano, y que a estos se añaden otros 8 millones de toneladas al año. A este ritmo, el volumen de plástico superará al de peces en 2050.



Proliferaciones de fitoplancton, en rojo en esta imagen satelital del golfo de México. Las bacterias descomponen las algas muertas, liberando CO_2 y absorbiendo oxígeno.

POCO DAÑO PUEDE HACER INTRODUCIR UNOS POCOS CONEJOS

ESPECIES INVASORAS



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Ryan M. Keane,
Michael J. Crawley (n. 1949)

ANTES
1951 Entra en vigor la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria para prevenir la introducción y difusión de plagas de plantas por el comercio internacional. La adoptan muchos países.

1958 Se publica el primer libro sobre la biología de las invasiones, *The ecology of invasions by plants and animals*, del ecólogo británico Charles Elton.

DESPUÉS
2014 Los estudios realizados sobre algunas de las especies invasoras más destructivas por ecólogos de las universidades de la Reina, en Belfast, y Stellenbosch, en Sudáfrica, revelan que su impacto ecológico se podía predecir por su comportamiento.

Las especies invasoras causan algunos de los daños más graves a los ecosistemas. Se trata de especies de plantas, animales u otros organismos no nativos de un ecosistema y que han sido introducidos por la actividad humana, ya sea deliberada o accidentalmente. Estas especies pueden actuar como competidoras, depredadoras o parásitas de las plantas o los animales nativos, o bien hibridar con ellos, cuya supervivencia amenazan.

El auge del conejo

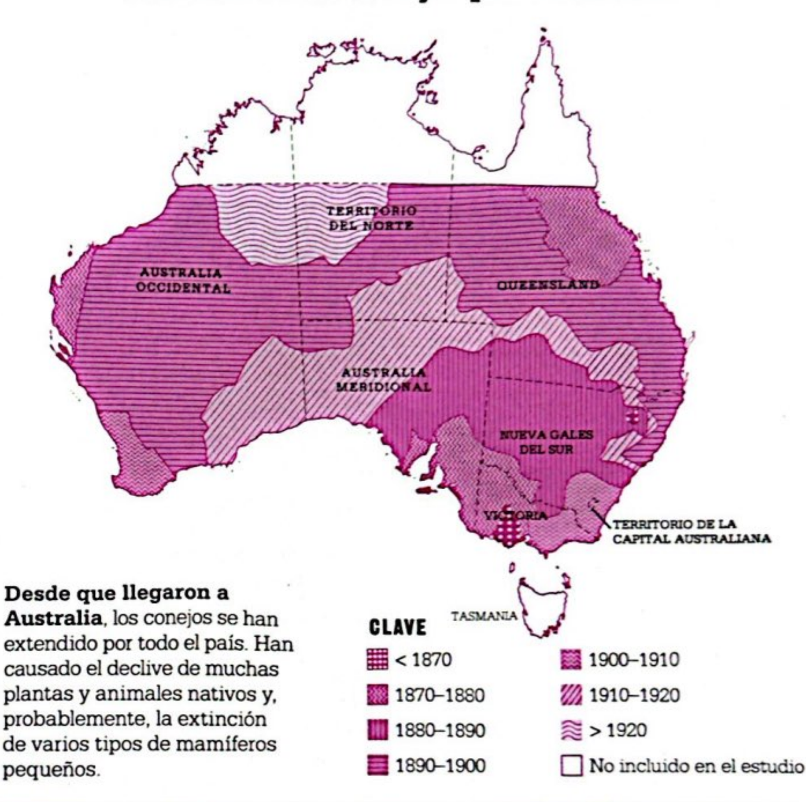
Una de las invasiones de especies más notables fue la del conejo común

Véase también: Ecuaciones predador-presa 44–49 ▪ Efectos no consuntivos de los depredadores sobre sus presas 76–77 ▪ Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ La cadena trófica 132–133 ▪ El ecosistema 134–137 ▪ Cambio de población caótico 184



La mariquita asiática multicolor es la más invasora del mundo. En Reino Unido, donde se vio por primera vez en 2004, se le atribuye el declive de otras siete especies nativas de mariquita.





Desde que llegaron a Australia, los conejos se han extendido por todo el país. Han causado el declive de muchas plantas y animales nativos y, probablemente, la extinción de varios tipos de mamíferos pequeños.

o europeo en Australia. Comenzó en 1788, al llegar once barcos procedentes de Gran Bretaña a la bahía de Botany para fundar la primera colonia penal australiana. A bordo de la primera flota, además de unos mil convictos y emigrantes, había seis conejos, traídos como alimento.

En la década de 1840, el conejo era un alimento básico en Australia, y se criaba en cercados de piedra. Todo cambió en 1859, cuando el colono Thomas Austin importó doce parejas de conejos y los soltó en su propiedad, cerca de Geelong, en Victoria. Veinte años después, los conejos habían migrado a Australia Meridional y Queensland, y en las dos décadas siguientes se extendieron a Australia Occidental. En 1920, la población de conejos era de unos 10 000 millones.

Los conejos parecen criaturas inofensivas, pero han sido un azote para las especies nativas de Australia, con las que compiten por recursos como la hierba, las herbáceas, las raíces y las semillas, degradando además la tierra. Son especialmente dañinos durante las sequías, cuando comen todo lo que encuentran para sobrevivir. Ha habido varios intentos de controlar la población salvaje, desde vallas a prueba de conejos de más de 3200 km de largo hasta la más eficaz introducción de los virus del mixoma y la neumonía hemorrágica, en 1950 y 1995, respectivamente. Las enfermedades resultantes han demostrado ser el mejor modo de controlar sus poblaciones y proteger a las especies nativas.

Los secretos del éxito

Mientras las especies invasoras se difundían por el mundo, los científicos han intentado explicar el éxito de algunas de estas especies, y determinar la manera de controlarlas sin causar problemas adicionales a los ecosistemas. Pese al impedimento que supone la falta de datos comparativos de las especies invasoras que no prosperan, se han desarrollado varias teorías para explicar el éxito de ciertas especies en entornos no nativos, entre ellas las hipótesis de la disponibilidad de recursos, de la evolución de una mayor capacidad competitiva y de la liberación respecto a enemigos previos.

En general, el éxito de una especie depende de diversos factores genéticos, ecológicos y demográficos. La hipótesis de la disponibilidad de recursos, propuesta en 1985 por los ecólogos Phyllis Coley, John Bryant »

El mejillón cebra

El caso del mejillón cebra sirve para ejemplificar modos diversos de enfocar el control de especies invasoras, así como los desafíos que plantean. Estos moluscos con concha de bandas, del tamaño de una uña, son nativos de Eurasia, pero se descubrieron en los Grandes Lagos de América del Norte en 1988, adonde se cree que llegaron en el agua de lastre vertida por barcos llegados de Europa. Desde entonces se han propagado por el Medio Oeste de EE UU, llegando incluso a California.

Los mejillones cebra se adhieren a las almejas y otros bivalvos, filtrando las algas que necesitan las especies nativas para sobrevivir. Atascan las tuberías de entrada de agua de centrales energéticas y depósitos de agua potable. Entre los actuales mecanismos de control hay sustancias químicas, agua caliente y sistemas de filtrado. Todos han mostrado alguna eficacia, pero ninguno ha sido capaz de erradicar en condiciones seguras la especie, que sigue expandiéndose por los cursos de agua de Europa, Asia y América del Norte.



Asistimos a una de las grandes convulsiones históricas de la flora y fauna mundiales.
Charles Elton





y F. Stuart Chapin, propone que una especie invasora prospera por estar ya bien adaptada al nuevo medio, y ser capaz de aprovechar cualquier excedente de recursos. Según la hipótesis de la evolución de una mayor capacidad competitiva, publicada por los ecólogos Bernd Blossey and Rolf Nötzold en 1995, las plantas invasoras que crecen con menor presencia de herbívoros en su nuevo entorno pueden dedicar más recursos a la reproducción y la supervivencia, superando en la competencia a las especies nativas. La hipótesis de la liberación (o escape) del enemigo, planteada por los ecólogos Ryan M. Keane y Michael J. Crawley en su artículo de 2002 «Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis», afirma que la especie invasora prospera por tener menos enemigos en su nuevo entorno. En realidad, el éxito de las especies invasoras se debe probablemente a muchos mecanismos que operan a la vez.

Plantas invasoras

Una planta que parece apoyar múltiples hipótesis sobre el éxito de las especies invasoras es la aliaria *(Alliara petiolata)*. Nativa de Europa, Asia occidental y central y el noroeste de África, los primeros colonos la llevaron a América del Norte con fines culinarios y medicinales, y se difundió rápidamente. La plaga de ella ha afectado al crecimiento de las semillas arbóreas y reducido la diversidad vegetal nativa, produciendo cambios en los ecosistemas de bosque invadidos.

En su medio nativo, la aliaria sirve de alimento a hasta 69 especies de insectos, ninguna de las cuales está presente en América del Norte. La falta de depredación y el éxito de la planta invasora corroboran la hipótesis de liberación del enemigo. La aliaria compite con éxito con



La aliaria, muy invasora en América del Norte, inhibe el crecimiento de otras plantas. En su hábitat nativo, se tiene por una flor silvestre atractiva pese a su intenso olor a ajo.

Desde su introducción en Australia en 1935, los sapos de caña han superado a las ranas nativas por reproducirse mucho más rápido.



las plantas nativas por los recursos, conforme a la hipótesis de disponibilidad de recursos. La aliaria, además, exuda compuestos secundarios que podrían «atacar» a las plantas nativas, inhibiendo su germinación y crecimiento. Esto responde a la hipótesis de las «armas nuevas», propuesta por los ecólogos Wendy M. Ridenour y Ragan M. Callaway en 2004, según la cual las especies invasoras cuentan con armas bioquímicas que les confieren una ventaja crucial sobre las especies nativas.

El arte del control

Las plagas de especies invasoras son extremadamente difíciles de controlar y casi imposibles de erradicar. Si la especie es una planta, lo más obvio es arrancarla o cortarla, pero son métodos que exigen mucho trabajo, sobre todo si el área es extensa. El empleo de sustancias químicas para destruir a las especies invasoras resulta con frecuencia eficaz, pero mata asimismo a las especies nativas, daña la salud del suelo y supone también una amenaza para la salud humana.

Un método de uso frecuente, el llamado control biológico, o biocontrol, enfrenta a las especies invasoras con los enemigos que le son propios. Uno de los primeros éxitos fue la introducción de las polillas de nopal de América del Sur en Australia en 1926 para que se alimentaran de los nopales y sus higos chumbos. La planta se introdujo en la década de 1770, y estaba infestando los campos de cultivo en Nueva Gales del Sur y Queensland. A principios de la década de 1930 se habían erradicado la mayoría de los nopales. No todos los controles biológicos resultan eficaces, y algunas medidas tuvieron consecuencias desastrosas. Por ejemplo, en 1935 se introdujeron sapos de caña para controlar al invasor escarabajo de la caña, que estaba destruyendo los cultivos de caña azucarera. El sapo había controlado eficazmente al escarabajo en Hawái, y se suponía que tendría el mismo éxito en Australia. Los escarabajos de la caña, sin embargo, se alimentan principalmente en lo alto de los tallos de caña, fuera del alcance de los sapos. Por desconocer los medios diferentes que prefieren las dos especies, se eligió una especie equivocada para el control biológico. Cuando se comprendió el error, los sapos se habían difundido por Australia, envenenando a todo depredador que intentara comer a este anfibio tóxico.

Incluso cuando se reduce la población de una especie invasora, el control biológico puede crear desequilibrios en los ecosistemas o la economía de las comunidades locales. Los organismos reguladores son, por tanto, generalmente reacios a aprobar controles biológicos sin amplios estudios previos. No hay soluciones mágicas para controlar cualquier especie invasora, al depender el remedio de las interacciones complejas de los ecosistemas, y los científicos siguen diseñando experimentos de campo para probar sus hipótesis sobre cómo funcionan las especies invasoras en la naturaleza. ■



Ahora es el momento de actuar. El coste para el medio y la economía se ha descontrolado.

Bruce Babbitt

Secretario de Interior de EE UU (1993–2001)



EL AUMENTO DE LAS TEMPERATURAS PERTURBA EL DELICADO EQUILIBRIO DEL SISTEMA

ADELANTO PRIMAVERAL



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Camille Parmesan (n. 1961)

ANTES
1997 En EE UU, un grupo de científicos publica pruebas de una temporada de crecimiento vegetal más larga en latitudes altas septentrionales en 1981–1991.

2002 El naturalista Richard Fitter revela que la primera fecha de floración de 385 especies de plantas se había adelantado 4,5 días en la década anterior.

DESPUÉS
2006 Jonathan Banks, de la American Clean Air Task Force, es el primero en llamar *«season creep»* al adelanto de las estaciones debido al cambio climático.

2014 En EE UU, la Evaluación Nacional del Clima confirma la tendencia hacia inviernos más cortos y suaves y al adelanto del deshielo primaveral.



Estamos viendo cambios mucho más rápidos de lo que esperaba hace diez años.
Camille Parmesan

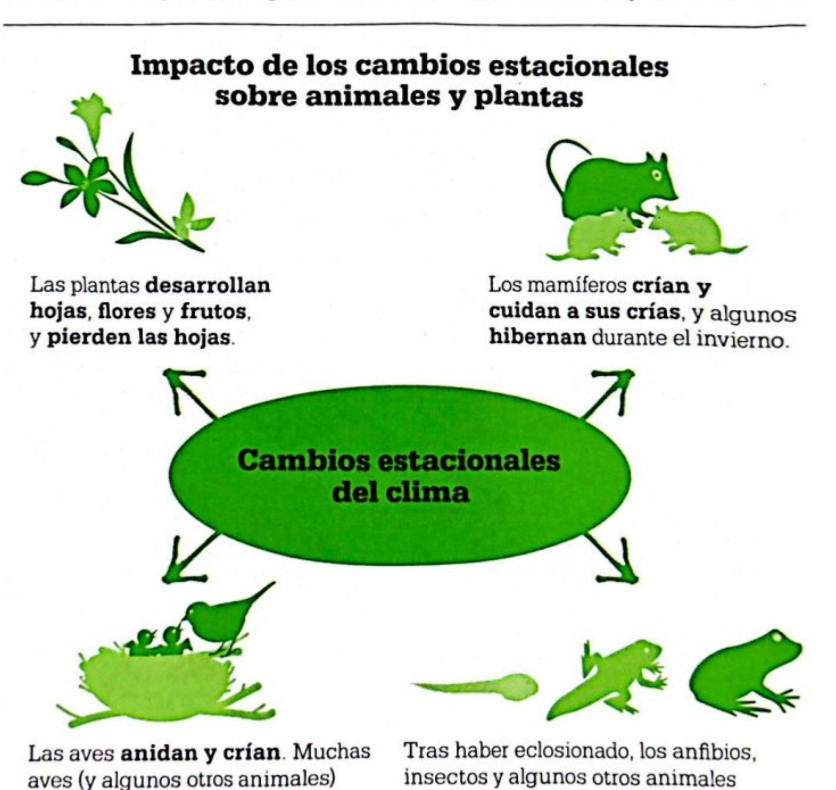


La mayoría de los científicos están de acuerdo en que el cambio climático, impulsado por el aumento de los gases de efecto invernadero, está haciendo aumentar la temperatura media global. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) cita un incremento de 1 °C desde 1880, aunque en algunas regiones haya sido mayor. El calentamiento afecta al comportamiento de las plantas y los animales, y el IPCC predice un aumento de entre 1,4 y 5,5 °C a lo largo de los próximos cien años.

Los ciclos vitales de las plantas y los animales cambian en función de las estaciones, y la fenología estudia dichos cambios. Pueden desencadenarlos la temperatura, las precipitaciones o la duración del día, pero la temperatura es probablemente el factor más importante por sí solo en las zonas templadas y polares de la Tierra, mientras que la lluvia es el factor clave en los trópicos. En 2003, los climatólogos Camille Parmesan y Gary Yohe demostraron que la primavera se ha adelantado, en el fenómeno que llamaron *«spring creep»*.

Adelanto de las estaciones

Durante décadas, muchos observaron que las hojas y las flores salían antes en primavera. Estas impresiones fueron en general ignoradas por carecer de datos, conjuntos de datos



Todas las formas de vida responden a los cambios de tiempo del ciclo estacional, que afectan a la migración, la cría, la floración, la hibernación y la metamorfosis, entre otros fenómenos.

Véase también: Ecología animal 106–113 ▪ Comportamiento animal 116–117 ▪ Fundamentos de la ecología vegetal 167 ▪ Calentamiento global 202–203 ▪ Hábitats en peligro 236–239 ▪ Detener el cambio climático 316–321

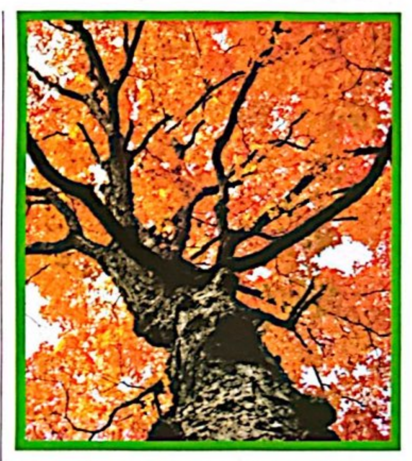
o cifras. Cuando Camille Parmesan y Gary Yohe publicaron las pruebas en 2003 –basadas en el análisis de más de 1700 especies–, demostraron que el cambio era muy real. Sus datos mostraban que el cambio primaveral se estaba adelantando una media de 2,3 días por década, y los estudios de otros científicos en los últimos años confirman sus hallazgos.

La temperatura gobierna muchos de los cambios de las plantas, como los periodos de crecimiento, la aparición de hojas, flores y frutos, y la muerte de las hojas en otoño. Las plantas son la base de la mayoría de las cadenas tróficas, por lo que estos cambios afectan a herbívoros y polinizadores. Estos están junto a la base de la cadena trófica como consumidores primarios, y si se les complica el hallar alimento, los consumidores secundarios que los cazan sufren por falta de presas.

Efectos del cambio climático

Una Tierra más cálida tiene muchas consecuencias: en la mayoría de las zonas frías de la Tierra, la temporada libre de hielo y nieve es más larga que antes, lo cual prolonga la temporada de crecimiento vegetal; a medida que algunas regiones se vuelven más secas y otras más húmedas, se vuelven más frecuentes las lluvias torrenciales y las inundaciones, y también las proliferaciones tóxicas de algas en los lagos; la cubierta de hielo en los polos está retrocediendo. Todos estos cambios han afectado y afectarán al comportamiento animal y vegetal.

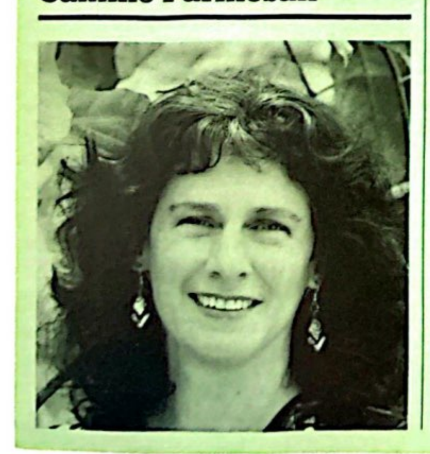
Desde 1993, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) ha reunido datos –procedentes de miles de estudios que se remontan al menos hasta 1943– para componer una imagen del adelanto primaveral en Europa. La evidencia de la AEMA indica fechas más tempranas para la producción de polen, el desove de las ranas y el anidamiento de las aves. Muchos insectos cuyos ciclos vitales están gobernados por la temperatura del aire (los insectos termofílicos, como las mariposas y los escarabajos escolitinos) tienen ahora una temporada de cría más larga que les permite producir generaciones extra cada año. Algunas mariposas que tenían antes dos generaciones ahora tienen tres.



Las hojas de algunas especies de roble se vuelven rojas antes de caer en otoño. Comparar la fecha en que ocurre esto de un año a otro puede aportar pruebas del cambio climático.

En España, los botánicos que estudiaron los datos de 29 especies de plantas hallaron que, en 2003, las hojas nacieron 4,8 días antes que la media en 1943; la floración se producía 5,9 días antes; los árboles daban fruto 3,2 días antes; y las hojas morían 1,2 días más tarde. En Reino »

Camille Parmesan



La catedrática estadounidense Camille Parmesan (1961) tiene una consolidada reputación como estudiosa destacada del cambio climático. Se doctoró en ciencias biológicas en la Universidad de Texas en Austin en 1995, y sus primeros estudios se ocuparon de la evolución de las interacciones entre plantas e insectos. Durante la mayor parte de los últimos veinte años ha centrado su atención en documentar los cambios en la distribución geográfica de las mariposas en América del Norte y Europa ligados al cambio climático. Parmesan ha sido una figura destacada del IPCC, y su trabajo ha sido muy premiado y citado en cientos de trabajos académicos. Es catedrática de Biología Integrativa en la Universidad de Texas, en Austin, además de asesora de organismos internacionales de conservación.

Obras principales

2003 «A globally coherent fingerprint of climate change impacts», *Nature*.
2015 «Plants and climate change: complexities and surprises», *Annals of Botany*.

Unido, el fenómeno era aún más marcado: en 53 especies de plantas, las hojas, flores y frutos aparecieron casi seis días antes en 2005 que en 1976. De modo análogo, la fructificación de 315 tipos de hongos estudiados en Gran Bretaña se prolongó de 33 a 75 días en la segunda mitad del siglo XX.

Unas temporadas de crecimiento más largas podrían parecer buena noticia, pero las temperaturas más altas tienen también inconvenientes. No todos los insectos son bienvenidos, y los inviernos más cortos y menos fríos matan menos insectos durmientes, y algunos experimentan explosiones de población y producen plagas dañinas. Las primaveras más cálidas permiten a las moscas sierra del pino, por ejemplo, cuyas larvas se alimentan de las hojas, desarrollarse antes de que las aves y parásitos que se alimentan de ellas puedan controlar su número. Sin freno, las moscas dejan sin hojas los árboles y les impiden crecer.



Algunas especies de abejas emergen antes en primavera, para coincidir con el adelanto de la floración en las plantas que polinizan, pero otras especies no han sido capaces de adaptarse.

Migración e hibernación

Las aves que migran cada primavera hasta nuevas fuentes de alimento también tienen problemas. Algunas han ajustado su calendario de vuelo para aprovechar la abundancia más temprana de insectos. Tras el viaje desde el África subsahariana, las primeras golondrinas llegan a Gran Bretaña unos veinte días antes que en la década de 1970, y los primeros aviones zapadores, veinticinco días antes. Pero hay pruebas de que el número de las aves que migran desde América Central a Nueva Inglaterra (EE UU) se ha reducido más rápido que el de las que permanecen en Nueva Inglaterra todo el año. Esto puede deberse a que las aves migratorias no han podido ajustar sus fechas de partida desde América Central para llegar a tiempo de beneficiarse de la abundancia temprana de insectos, como hacen las especies locales.

El cambio climático parece haber afectado también a los animales que hibernan. Según los zoólogos del Laboratorio Biológico de las Montañas Rocosas, las marmotas de vientre amarillo salieron de la hibernación 38 días antes en 1999 que en 1975. En 2012, los científicos de la Universidad de Alberta hallaron que, en las últimas dos décadas, la nieve tardía había retrasado diez días la salida de la hibernación de las ardillas terrestres de las Rocosas. Esto acorta el periodo activo durante el cual se aparean, crían y se alimentan para pasar el siguiente ciclo de hibernación.

Desacoplamiento

La supervivencia de algunos seres vivos podría estar amenazada por el «desacoplamiento» de las interacciones entre especies, que puede pertur-



De lo que hace años solo se sospechaba, hay certeza. La política tiene que alcanzar a la ciencia.
Camille Parmesan

”



Un carbonero común alimenta a sus polluelos. Si crían pasado ya el pico de población de las orugas, habrá menos alimento para ellos, y menos sobrevivirán.

bar el equilibrio de los ecosistemas. Si la floración se adelanta, las abejas que las polinizan pueden responder emergiendo antes o desplazándose a una latitud más alta para coincidir con la floración más lejos del ecuador. Los estudios sobre diez especies de abejas en el nordeste de América del Norte muestran que su comportamiento ha cambiado en función del adelanto de la floración. En Colorado, en cambio, los abejorros no se han adaptado a los cambios, y su población se ha reducido. Si decae el número de polinizadores, decae también el de las plantas que polinizan.

Hay pruebas de que muchos consumidores primarios han hecho reajustes para adaptarse a fenómenos naturales cambiantes, pero esto parece plantear dificultades mayores a las especies en partes más altas de la cadena trófica. Las aves anidan ahora antes que hace años, pero la emergencia de los insectos se ha adelantado más rápido, un problema para las aves que dependen de los picos de abundancia de los insectos. Así, los papamoscas cerrojillo y carboneros comunes alimentan a sus polluelos con orugas que abundan durante una temporada corta de la primavera. Debido al cambio climático, el pico de las orugas se ha adelantado, pero las aves no han sido capaces de adelantar sus fechas de puesta lo suficiente para aprovechar los días de abundancia. Los estudios muestran que sobreviven menos polluelos de papamoscas y de carbonero. La población de papamoscas ha caído en los bosques de los Países Bajos, posiblemente a causa del cambio climático.

Tomar medidas

Estas pruebas han movido a los climatólogos a presionar a los gobiernos y exigir cambios de política. Los científicos han esgrimido el adelanto de la primavera como una prueba definitiva de que está teniendo lugar el cambio climático, y los estudiosos han reclamado a los políticos que combatan el calentamiento global para salvar las especies cuya misma existencia está amenazada por los cambios fenológicos. ■

Mariposas saltacercas y cambio climático

El cambio climático produce a veces resultados inesperados. Por ejemplo, en Gran Bretaña, las condiciones climáticas cambiantes han perturbado el ciclo vital de la mariposa saltacercas, que antes producía dos generaciones cada verano. Las mariposas adultas de finales del verano se apareaban, las hembras ponían huevos, y las orugas hallaban alimento suficiente en septiembre para crecer e hibernar. Al llegar la primavera, las orugas se metamorfoseaban en pupas de las que luego emergían adultos. El clima más cálido ha permitido una tercera generación en otoño, con ejemplares adultos volando hasta mediados de octubre. Cuando eclosionan las orugas de la tercera generación, hay poco alimento, por lo que la mayoría de las orugas muere. Esta «trampa del desarrollo», es la causa probable del declive de la población de las mariposas saltacercas.



La distribución de la mariposa que estaba estudiando se había movido medio continente. Es algo importante, me dije, y todo ha venido a confirmarlo.
Camille Parmesan





LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS, GRAN AMENAZA PARA LA BIODIVERSIDAD

VIRUS DE ANFIBIOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Malcolm McCallum
(n. 1968)

ANTES
1989 Se declara extinto el antes común sapo dorado de Costa Rica. Se proponen explicaciones diversas.

1998 En EE UU, se atribuye al hongo quítrido la muerte de muchas ranas punta de flecha en el Zoológico Nacional de Washington, D.C.

DESPUÉS
2009 Se declara extinto el sapo *Nectophrynoides asperginis* de Tanzania debido a la infección del hongo quítrido.

2013 Una segunda especie de hongo quítrido casi extingue a la salamandra común en los Países Bajos.

2015 Se detecta el hongo quítrido en anfibios de 52 de los 82 países estudiados.

Desde la década de 1980 ha habido reducciones drásticas y extinciones localizadas en las poblaciones de cientos de especies de anfibios, a una tasa que se estima doscientas veces la tasa de fondo no afectada por la actividad humana. Este fenómeno alarmante atrajo la atención pública por primera vez en 1999, cuando el científico ambiental estadounidense Malcolm McCallum publicó sus hallazgos sobre el aumento drástico de las deformidades en ranas. Luego, McCallum publicó estudios de referencia sobre declive y extinción de anfibios.

Las causas del problema son variadas, e incluyen la destrucción de hábitat y la contaminación, además de la competencia de especies no nativas, pero una de las causas más devastadoras es la enfermedad, con dos culpables especialmente letales.



La rana toro de América del Norte es inmune al hongo quítrido, pero actúa como transmisora de la mortal infección a otras especies de anfibios.

Quítridos y ranavirus

La quitridiomicosis es la infección del hongo quítrido, y ha devastado sobre todo poblaciones de ranas y sapos. El hongo afecta a la piel de los anfibios, que no pueden respirar, hidratarse, ni regular la temperatura. Se ignora su origen exacto, pero el comercio global de anfibios, como mascotas, alimento, cebo de pesca o animales de laboratorio, ha sido decisivo para su difusión.

Los ranavirus evolucionaron a partir de un virus de los peces. Infectan a anfibios y reptiles, y han diezmado especies de ranas desde la década de 1980. El ranavirus del sapo partero común causa hemorragias, llagas cutáneas, letargo y demacración, y es especialmente virulento por su facilidad para pasar de una especie a otra. ■

Véase también: Biomas 206–209 ▪ Contaminación 230–235 ▪ Hábitats en peligro 236–239 ▪ Deforestación 254–259 ▪ Sobrepesca 266–269



IMAGINA INTENTAR CONSTRUIR UNA CASA MIENTRAS NO PARAN DE ROBARTE LADRILLOS

ACIDIFICACIÓN DE LOS OCÉANOS

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Kenneth Caldeira (n. 1960), **Michael E. Wickett** (n. 1971)

ANTES
1909 El químico danés Søren Sørensen crea la escala del pH para medir la acidez.

1929 Alfred Redfield y Robert Goodkind, biólogos estadounidenses, descubren que el exceso de CO_2 en el agua asfixia a los calamares.

1933 Primer sondeo global de la acidez del océano, al analizar el químico alemán Hermann Wattenberg los datos de la expedición atlántica del buque de investigación *Meteor*.

DESPUÉS
2012 En EE UU, el oceanógrafo James C. Zachos y sus colegas muestran pruebas fósiles de extinciones masivas de animales marinos ocurridas en el pasado, debidas a la acidificación de los océanos.

Añadir CO_2 al aire no solo provoca el cambio climático; también vuelve más ácida el agua de los océanos, que hasta ahora se han llevado la peor parte de los efectos del calentamiento global. Los océanos absorben hasta la mitad del CO_2 que añade la actividad humana a la atmósfera, pero esto altera su química.

En 2003, los climatólogos estadounidenses Ken Caldeira y Michael E. Wickett analizaron los efectos de la contaminación por CO_2 en los océanos. Tomaron muestras de agua de todo el mundo, y hallaron un claro aumento de la acidez en los últimos doscientos años de industrialización. Predijeron que la acidificación de los océanos se aceleraría en los próximos cincuenta años, con resultados dañinos.

Para mantener los carbonatos con los que construyen sus conchas y esqueletos, muchos animales marinos dependen de la alcalinidad natural del agua de mar. Una reducción leve perturba gravemente el desarrollo, sobre todo en organismos sensibles como los corales o el plancton. La acidificación puede eliminar a los corales en décadas, y ese será el fin de los ecosistemas de arrecife. El fitoplancton, base de la red trófica oceánica, es fundamental para mantener el nivel global de oxígeno. La acidificación de los océanos es mucho más difícil de revertir que los efectos atmosféricos de las emisiones de CO_2, y su devastador impacto sobre la biodiversidad, la pesca y la seguridad alimentaria es alarmante. ■



El océano absorberá la mayor parte del dióxido de carbono liberado a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles.
Ken Caldeira y Michael E. Wickett



Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Contaminación 230–235 ▪ Hábitats en peligro 236–239 ▪ Lluvia ácida 248–249



EL DAÑO AMBIENTAL DEL CRECIMIENTO URBANO INCONTROLADO NO SE PUEDE IGNORAR

LA EXPANSIÓN URBANA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Robert Bruegmann (n. 1948)

ANTES
1928 El arquitecto británico Clough Williams-Ellis compara el crecimiento de Londres con el de un pulpo devorando el campo.

Década de 1950 Con la prosperidad de la posguerra y el auge del automóvil, la clase media de EE UU cambia los centros urbanos por nuevas áreas de menor densidad en los suburbios.

DESPUÉS
2017 Se pide levantar las restricciones para construir en el cinturón verde que rodea las grandes ciudades de Reino Unido por la crisis de la vivienda.

2050 La fecha en que, según la ONU, la población urbana mundial será de 6340 millones, sobre una población proyectada de 9700 millones.

Desde la década de 1950, se viene llamando expansión urbana a la dispersión de los suburbios de baja densidad más allá de los núcleos urbanos densos. *The Times* empleó por primera vez la expresión *«urban sprawl»* en 1955, para referirse a la dispersión y expansión de los suburbios de Londres. En esos años, los planificadores urbanos establecieron «cinturones verdes» alrededor de las ciudades, donde estaba casi totalmente prohibido edificar, pensados para impedir que las ciudades crecieran hasta unirse unas con otras. Las definiciones modernas de la expansión o dispersión varían, pero el concepto es generalmente negativo. En su variante más extrema, ha creado megaciudades, definidas por la ONU como ciudades de más de 10 millones de habitantes. Entre los ejemplos de ello están Tokio-Yokohama (38 millones), Yakarta (30 millones) y Delhi (25 millones).



La ciudad vieja está sumergida en una región urbana extensa, de múltiples centros, de baja densidad, y muy heterogénea.
Robert Bruegmann



Perturbación ecológica

Algunos estudiosos mantienen que la expansión urbana es la amenaza más grave de origen humano a la biodiversidad. Los suburbios contienen relativamente pocas personas, pero requieren un nivel desproporcionado de infraestructuras, como el suministro de energía y agua, y redes de transporte. Al expandirse la ciudad, se sepultan en hormigón tierras agrícolas valiosas, y los hábitats naturales se desvirtúan o se pierden por completo. La expansión o dispersión afecta también a la fauna y flora locales, al introducirse mascotas y plantas invasoras que amenazan a las especies nativas. El transporte público limitado en las áreas de baja densidad supone también que la población suburbana tiende a ser dueña de más de un coche, lo cual agrava el nivel de contaminación de las ciuda-

Véase también: Contaminación 230–235 ▪ Hábitats en peligro 236–239 ▪ Deforestación 254–259 ▪ Agotamiento de recursos naturales 262–265 ▪ Virus de anfibios 280



Toluca, antaño una ciudad pintoresca al oeste de Ciudad de México, tiene hoy en día más de 800000 habitantes, y se está uniendo gradualmente a Ciudad de México, con un gran coste ecológico.

des, como hacen también las estufas de leña y carbón de las poblaciones de chabolas del extrarradio.

La superficie de las áreas urbanas del mundo combinadas es de una vez y media el tamaño de Francia. Ciudad de México se ha expandido más que ninguna otra de Occidente, y en ella viven 21 millones de personas; ha crecido más allá de sus límites oficiales, y lo ha hecho desproporcionadamente: entre 1970 y 2000, la superficie urbana creció 1,5 veces más rápido que la población. El 59% del territorio de la ciudad está protegido, pero la tala ilegal y la expansión urbana siguen degradando el bosque urbano, las praderas y las reservas de agua.

Se estima que el 37% de todo el crecimiento urbano hasta 2050 tendrá lugar en China, India y Nigeria. En Pekín y otras ciudades de China, se están demoliendo los *hutongs* (callejones) densamente poblados por los pobres, para dejar sitio a los bloques de lujo de baja densidad, alejando los límites urbanos –y a los pobres urbanos– del centro. La dependencia del automóvil en los nuevos barrios y la falta de un núcleo central dejan escaso lugar a la vida comunitaria.

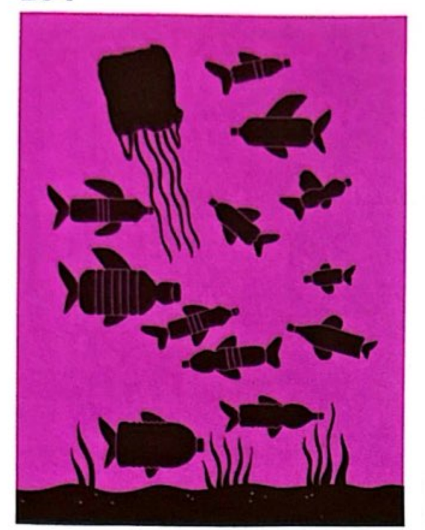
Consciente de los problemas de la urbanización, el gobierno chino está tratando de limitar la población de Shanghái a 25 millones y la de Pekín a 23, restringiendo el suelo edificable, controlando la llegada de personas y obligando a marcharse a los trabajadores no cualificados. También se están construyendo barrios de mayor densidad con calles más estrechas, más intersecciones, y más transporte público para favorecer la formación de comunidades. ■

El ajolote en peligro



Una de las víctimas de la expansión urbana de Ciudad de México ha sido el ajolote, una salamandra de colores diversos que parece un pez pero es un anfibio. Capaz de crecer hasta alcanzar los 30 cm de longitud, el ajolote se alimenta de insectos acuáticos, peces pequeños y crustáceos, y puede regenerar los miembros perdidos. Este rasgo ha convertido a especímenes cautivos de ajolote en un objeto importante para el estudio científico, y son también comunes en acuarios domésticos y de exposición al público.

Históricamente, el ajolote habitaba en los canales urbanos creados por el pueblo azteca al construir su capital, Tenochtitlán, en el siglo XIII, y en la red de lagos alrededor de la ciudad que alimentaba los canales. Estos se perdieron al crecer Ciudad de México. El ajolote fue incluido en 2006 en la lista de especies en peligro crítico de extinción, y llegó a darse por extinto en estado salvaje en 2015, pero más adelante se encontraron algunos ejemplares en el lago de Xochimilco, al sur de Ciudad de México.



LOS OCEANOS SE ESTAN CONVIRTIENDO EN UNA SOPA DE PLASTICO

UN PÁRAMO DE PLÁSTICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Charles J. Moore (n. 1947)

ANTES
Década de 1970 Los científicos estudian los detritos plásticos en el mar tras la noticia, en *Science*, de gran cantidad de gránulos de plástico en el Atlántico Norte.

1984 La primera Conferencia Internacional sobre Detritos Marinos en Hawái trata de concienciar del problema creciente de la basura marina.

DESPUÉS
2016 *Un océano de plástico*, documental del periodista australiano Craig Leeson, relata los efectos globales de la contaminación por plásticos.

2018 La red del Día de la Tierra, comprometida con la difusión mundial del movimiento ecologista, hace de la contaminación por plásticos el tema del Día de la Tierra del año.

Cuando se produjeron plásticos en masa por primera vez a principios del siglo XX, maravillaron al mundo con la versatilidad y durabilidad de un material que se podía moldear de diversas formas, usar y tirar. El problema del plástico es que la mayor parte nunca desaparece. Según *The Economist*, solo el 20 % de los 6300 millones de toneladas de plástico producido en el mundo desde la década de 1950 se ha quemado o reciclado. Esto supone que el 80 % –5000 millones de toneladas– está en vertederos o en el medio ambiente.

Contaminación del océano

Los microplásticos –pequeños fragmentos de menos de 5 mm de diámetro– son aún más difíciles de limpiar que otros plásticos. Constituyen el 90 % de los detritos plásticos del océano, y navegan por las corrientes como una sopa turbia. El problema fue identificado en 1999 por el oceanógrafo y capitán estadounidense Charles Moore, quien lo trató en su libro *Plastic Ocean*, de 2011. Mientras navegaba de regreso a California tras una regata de vela, Moore topó con una vasta extensión de desechos plásticos en el Pacífico. Hoy se sabe que la gran zona (o isla) de basura en el Pacífico tiene un área superior a la de Francia, Alemania y España juntas, y se compone de 79 000 toneladas de microplásticos, amasados por la corriente conocida como giro del Pacífico Norte.

La isla de basura del Pacífico no es la única, sino que hay otras en el Atlántico y el Índico, además de en



Vaciado de un *seabin* («cubo de basura de mar») en Sídney. El Proyecto Seabin, iniciado en Australia en 2015, combate la contaminación por plásticos filtrando el agua superficial de puertos y bahías.

Véase también: El dominio de la naturaleza por la humanidad 296 ▪ Devastación humana de la Tierra 299 ▪ El Programa sobre el Hombre y la Biosfera 310–311

El plástico se **recicla**, se **quema** y se lleva a un **vertedero**, o se **vierte** al **océano**.



Tarda **miles de años** en **descomponerse**.



El oleaje y los **rayos ultravioleta** rompen el **plástico** del océano en **pequeños fragmentos** que **viajan** por el **agua**.



Los océanos se están convirtiendo en una sopa de plástico.

otros mares, como el del Norte. Las micropartículas de plástico, introducidas por las empresas cosméticas en la década de 1990, agravan el problema. Presentes en productos como jabones, exfoliantes y pasta dentífrica, viajan por los conductos de aguas residuales a los ríos y océanos, donde las ingieren los peces y otros animales, con los mismos efectos dañinos que los microplásticos (recuadro, dcha.).

Pasos para limitar el plástico

Limpiar la contaminación por plásticos es una tarea pantagruélica. Romper los enlaces químicos de los componentes del plástico requiere gran cantidad de energía, y también daña el medio. La mejor solución es aprender a vivir sin plástico. La mayoría de los países han prohibido o establecido fechas límite para el uso de las micropartículas en cosméticos, y muchos, siguiendo el ejemplo de Bangladesh en 2002, están prohibiendo ofrecer bolsas de plástico de un solo uso. Otras medidas son prescindir de las pajitas de plástico, y promover el uso de botellas reutilizables y empaquetados reciclables o compostables. ■



La sociedad desechable es incontenible, y ahora es global. No podemos guardar y mantener o reciclar todas nuestras cosas.

Charles J. Moore



Efectos en la naturaleza

Los plásticos suponen varios riesgos para la vida salvaje. Los artículos de mayor tamaño, como las bolsas, estrangulan o ahogan a aves y animales marinos. Si se ingieren, dañan el aparato digestivo, o matan por inanición al obstruir el estómago. Las toxinas de los microplásticos pasan a los tejidos grasos, en un proceso que se transmite por la cadena trófica. Según Greenpeace, nueve de cada diez aves marinas, una de cada tres tortugas marinas y más de la mitad de la población de ballenas y delfines han comido plástico, y consta que lo han ingerido crustáceos de la fosa de las Marianas, en el Pacífico occidental, el punto más profundo de la Tierra.

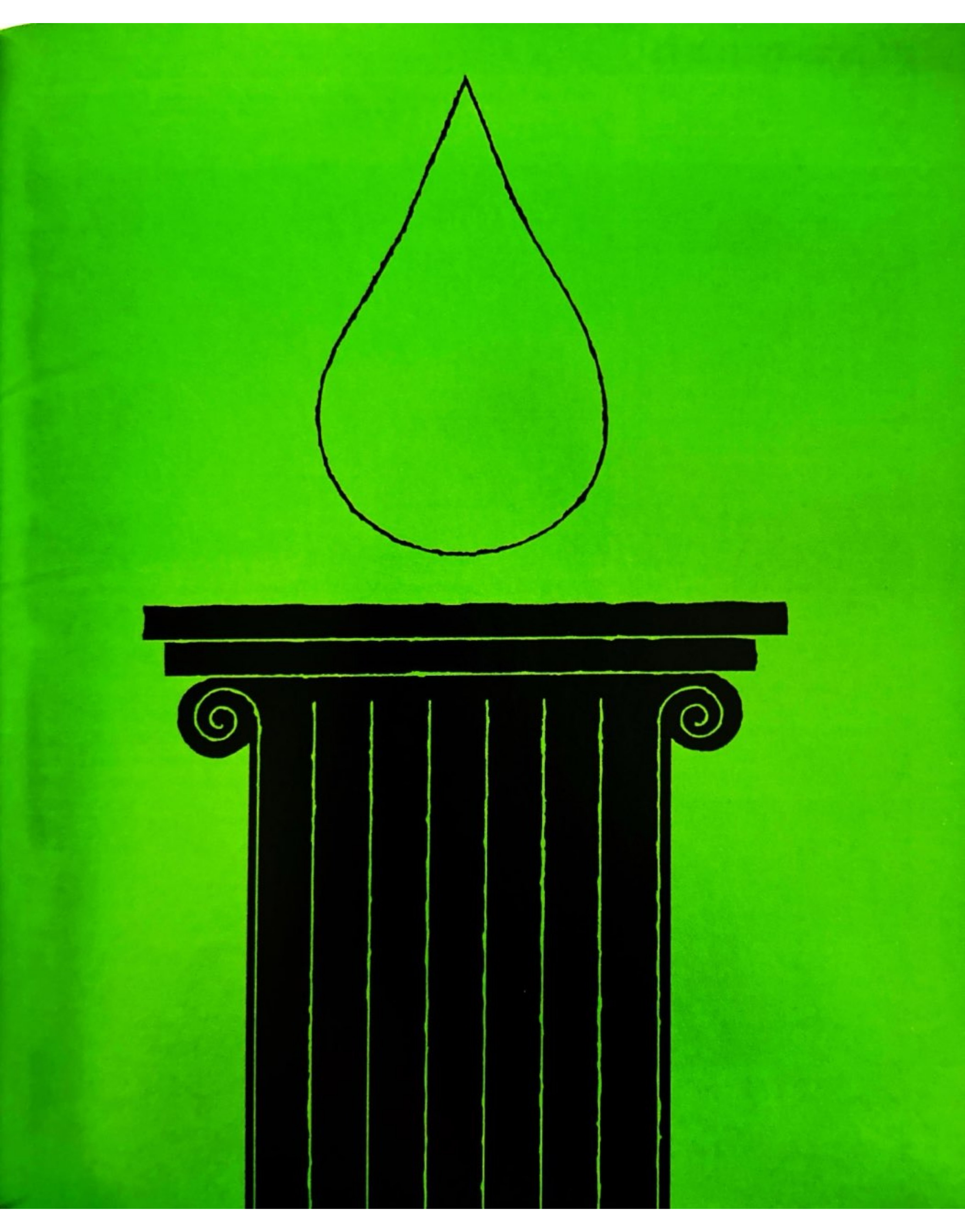
Las empresas empiezan a tomar en serio la necesidad de reducir el uso de los plásticos. Así, una empresa cervecera de Florida usa productos derivados de la elaboración de la cerveza para hacer los anillos de seis latas, con el fin de que las aves que queden atrapadas en ellos puedan romperlos con el pico.



Un alcatraz común, atascado en una red de anillos de seis latas. Corren mayor riesgo de tales percances aves que revuelven en la basura de la costa, como las gaviotas.

EL AGUA ES UN BIEN PUBLICO Y UN DERECHO HUMANO

LA CRISIS DEL AGUA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Maude Barlow (n. 1947)

ANTES
1983–1985 La sequía en Etiopía, Eritrea y Sudán causa 450 000 muertes.

1990 El Programa para el Medio Ambiente de la ONU declara peor desastre ecológico del siglo xx la desecación del mar de Aral.

2008 La ONU estima que las enfermedades derivadas de la mala calidad del agua y del pobre saneamiento causan unas 42 000 muertes semanales.

DESPUÉS
2011–2017 Una de las peores sequías registradas en California afecta al medio ambiente, a la agricultura y a la vida cotidiana.

2017 La activista del agua Maude Barlow revela que han desaparecido la mitad de los ríos de China desde 1990.



La vida requiere acceso al agua limpia, y negarlo es negar el derecho a la vida. Ha llegado el momento de la idea de luchar por el derecho al agua.
Maude Barlow





Cola para recoger agua en una zona de chabolas de Hyderabad (India) en 2007. India sufrió una crisis del agua en 2018, y se espera que la demanda doble la oferta disponible en 2030.

En 2008, la canadiense Maude Barlow defendía que la escasez del agua se había convertido en la crisis humana más urgente del siglo xxi. Señalando el carácter comunal y compartido del agua como recurso, y el acceso al agua como derecho humano, explicó cómo el resultado del despilfarro, la contaminación y el consumo excesivo es que ya no se puede contar con que el ciclo del agua –el intercambio constante de agua entre la superficie de la Tierra y la atmósfera– proporcione un suministro ilimitado. Barlow sostiene que en los países en vías de desarrollo, la escasez del agua es una crisis cuya carga soportan sobre todo mujeres y niños, y que, a falta de medidas drásticas, la crisis acabará afectando también al resto del mundo.

Unos 1100 millones de personas carecen de acceso fácil al agua, y esta escasea durante al menos un mes al año para 2700 millones de personas. Aunque el 70 % de la superficie terrestre está cubierta de agua, casi toda es agua salina oceánica. Solamente el 0,014 % del agua del planeta es potable y fácilmente accesible. Se obtiene principalmente de ríos, lagos y acuíferos subterráneos (agua contenida en o entre las rocas del subsuelo). Usamos el agua para beber, lavarnos, regar cultivos y para uso industrial, y la crisis del agua afecta a todas las plantas y animales terrestres que dependen del agua para sobrevivir.

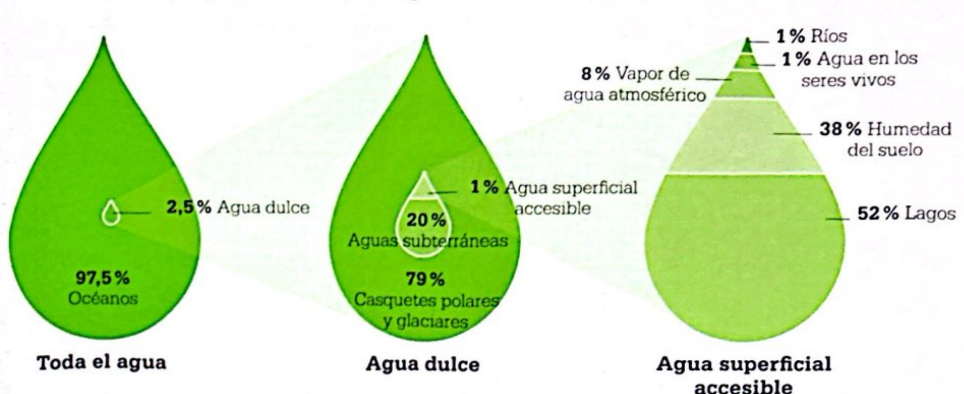
Agua despilfarrada

Una población humana mayor consume más agua, y una gran proporción de esta se despilfarra, sobre todo en los países desarrollados, en los que se usa unas diez veces más agua de media que en el mundo en vías de desarrollo. Se han agotado fuentes de agua potable (por ejemplo, gran parte del río Grande, o río Bravo, entre México y EE UU), o se están vol-

Véase también: El ecosistema 134–137 ▪ Contaminación 230–235 ▪ Lluvia ácida 248–249 ▪ Sobrepoblación 250–251 ▪ Agotamiento de recursos naturales 262–265

Distribución del agua mundial

El agua potable de fácil acceso es un recurso muy frágil. Solo una fracción minúscula del agua disponible en el planeta es inmediatamente apta para el consumo humano.



viendo inaprovechables por la contaminación. El Ganges, en India, y el Citarum, en Java (Indonesia), son dos de los ríos más contaminados del mundo. Al ritmo actual de consumo, la situación se deteriorará aún más. En 2030, dos tercios de la población mundial pueden sufrir escasez, y los ecosistemas también sufrirán.

Aumento de la demanda

El uso humano de agua potable se ha triplicado desde 1970, y la demanda crece en 64 000 millones de m³ anuales, en parte debido al aumento de la población en 80 millones de habitantes por año. El aumento de la demanda responde también al cambio de estilo de vida y hábitos alimentarios, que incrementan el consumo por persona. La producción de biocombustibles ha crecido también, con un impacto importante sobre la demanda de agua. Hacen falta entre 1000 y 4000 litros de agua para hacer un litro de biocombustible.

En el último siglo ha desaparecido la mitad de los humedales, para hacer sitio a campos de cultivo, para construir o porque se extrae agua subterránea de los acuíferos más rápido de lo que se reponen las reservas. La reducción de los humedales significa que las plantas y los animales que dependen de ellos han desaparecido también. Casi la mitad del agua potable procede de acuíferos, de los que se extraen unos 1000 km³ al año. Dos tercios se destinan a regar cultivos; »

Maude Barlow



Nacida en Toronto (Canadá) en 1947, Maude Barlow es activista y crítica de las políticas de gestión del agua. Es autora o coautora de 18 libros, entre ellos el éxito de ventas *Oro azul: las multinacionales y el robo organizado del agua*. Barlow trabajó como asesora de Naciones Unidas para temas del agua, e hizo campaña por el reconocimiento del agua como derecho humano básico. Con este fin, en 2012, ayudó a fundar el proyecto Planeta Azul. Barlow preside el grupo de acción social Consejo de Canadienses, y fue una de las «1000 Mujeres por la Paz» nominadas en 2005 para el premio Nobel de la Paz. En 2008 recibió el Citation of Lifetime Achievement, el mayor honor de Canadá en el ámbito del medio ambiente.

Obras principales

2002 *Oro azul: las multinacionales y el robo organizado del agua.*
2007 *Blue covenant: the global water crisis and the coming battle for the right to water.*
2014 *Blue future: protecting water for people and the planet forever.*



Un barco varado en el lecho seco del mar de Aral. La pérdida de un lago tan grande ha tenido un efecto devastador sobre la agricultura, el clima y la industria pesquera locales.

La desecación del mar de Aral

La desaparición del mar de Aral (Kazajistán), antaño cuarto mayor lago del mundo, ha sido un gran desastre ecológico. A inicios de la década de 1960 se desviaron los dos ríos principales que alimentaban el lago para regar campos de algodón en Asia central. En junio de 2004, la ONU advirtió de que el lago se podía secar a falta de medidas para salvarlo. Recibía entonces un 10 % del agua que recibía antes, se había dividido en varios lagos menores, y contenía la décima parte del volumen de agua que tenía en 1960. Extensas zonas se han convertido en desierto. La mayoría de los peces y demás vida acuática han desaparecido con el agua. En otros tiempos se pescaba esturión del río Sir Daria, pero su número cayó al menguar el lago y volverse más salino. Los esfuerzos por realimentarlo han logrado aumentar la superficie y la profundidad, y las poblaciones de peces están creciendo.

el 22 %, al uso doméstico; y el 11 %, a la industria. El agua de los acuíferos se repone mucho más despacio de lo que estos se vacían de ella, por lo que su rendimiento decrece con el tiempo. Cuando desciende el nivel freático, algunos lagos y ríos se secan. En torno a la mitad de la longitud total de los ríos de China ha desaparecido desde 1990. En América del Norte, los Grandes Lagos están menguando, el lago Winnipeg está amenazado y el acuífero de Ogallala se está agotando. Hay problemas de suministro incluso en Brasil, el país más rico en agua de la Tierra. A medida que empeora la situación, esta se vuelve cada vez más conflictiva.

Escasez de agua

Hay dos tipos de escasez. La escasez física de agua afecta a regiones donde esta falta de manera natural, como el norte de África, la península Arábiga, las grandes extensiones de Asia central y meridional y el suroeste de EE UU. La escasez económica, en cambio, se da donde el agua existe, pero falta la infraestructura económica para aprovecharla. Esta es la situación en gran parte del África subsahariana y partes de América Central, cuyos habitantes

Estrés hídrico en el mundo

CLAVE

- Ninguno
- 1–9 meses
- 10–12 meses
- • Principales ciudades que sufren escasez

Londres
Nueva York
Los Ángeles
Ciudad de México
Estambul
El Cairo
Bombay
Nueva Delhi
Pekín
Tokio
Osaka
Shanghái
Río de Janeiro
São Paulo

Este mapa ilustra la exposición media al estrés hídrico, que resulta de comparar el total de agua extraída con el total renovado en un área dada. Una tasa mayor de extracción indica que hay más consumidores compitiendo por un suministro limitado.



El mundo no ha despertado cabalmente a la realidad de a qué nos enfrentamos en materia de crisis relacionadas con el agua.
Rajendra Pachauri
Presidente del IPCC



pasan gran parte del día caminando hasta la fuente más próxima, y donde la tarea de ir a buscar agua interfiere con la escolarización de muchos niños.

Preocupación por la vida salvaje

La crisis del agua es perjudicial para la humanidad, y para algunos animales puede suponer la extinción o la reducción de su población. Un ejemplo es el del delfín rosado de las cuencas del Amazonas y el Orinoco en América del Sur, cuyo número se ha reducido en parte derivados de la contaminación con metales pesados por la explotación minera, pero también por la construcción de presas. Estas restringen la migración de los peces, su alimento, a sus lugares de desove. En China, el mayor anfibio del mundo, la salamandra china gigante, está en peligro crítico de extinción por la construcción de presas para obtener energía hidroeléctrica. Tales obras de ingeniería cambian el curso natural de los ríos, modificando el hábitat de los animales.

Es esencial una perspectiva holística para impedir que la crisis del agua se agrave mucho más. Una planta de tratamiento de aguas residuales que emplee energía limpia, por ejemplo, puede aportar el agua necesaria para regar cultivos de biocombustibles; estos, a su vez, sirven para purificar el agua, sin emitir gases de efecto invernadero.

Potabilización de aguas residuales

Las nuevas tecnologías pueden servir también para potabilizar las aguas residuales, proceso que antes consumía mucha energía. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) insiste en que las políticas de gestión del agua pueden causar emisiones mayores de gases de efecto invernadero, pero no será el caso si la conversión se realiza usando energía solar, que empieza a sustituir al petróleo en las plantas desalinizadoras de Oriente Próximo. En algunas partes del mundo hay lluvias estacionales fuertes, como los monzones, pero el agua acaba desaprovechada en ríos contaminados. Los planes para captarla y embalsarla serían de gran ayuda.

Otras iniciativas útiles serían reducir la contaminación y el despilfarro en los regadíos y la industria, ofrecer nuevas soluciones tecnológicas a los países en desarrollo y llegar a acuerdos internacionales. Al fin y al cabo, la captación del agua no respeta fronteras políticas. ■



No hay país rico en agua en el mundo que no esté teniendo problemas.
Maude Barlow



Agua de Salisbury

En Adelaida (Australia Meridional), el sistema de reciclado de agua que funciona en el suburbio de Salisbury ha reducido la extracción de agua del río Murray a la mitad. Las aguas residuales del alcantarillado y el agua de lluvia de los desagües se tratan y se encauzan hacia cincuenta humedales, donde crecen cañaverales y otros tipos de vegetación acuática que depuran aún más el agua. El agua reciclada no potable de los humedales se canaliza para el aprovechamiento de los habitantes, sirviendo para vaciar cisternas, regar jardines, llenar estanques ornamentales y lavar coches.

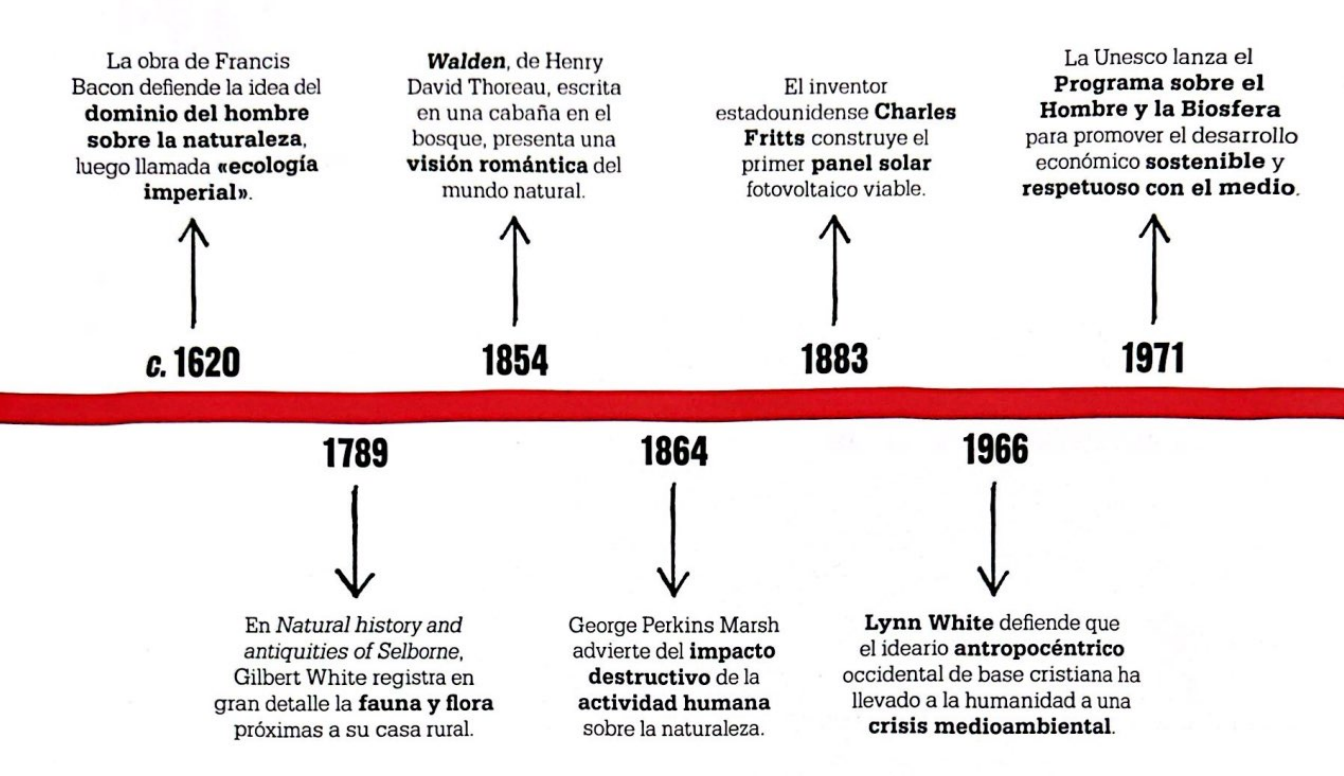
Además de ofrecer una fuente más sostenible de agua, este innovador sistema ha favorecido la biodiversidad en los nuevos humedales. Entre las aves actualmente residentes o de paso hay patos, espátulas, garzas, pelícanos, cormoranes y aves limícolas migratorias, junto con especies de peces y anfibios e invertebrados acuáticos.



El agua reciclada de Salisbury tiene beneficios ambientales, como reducir la demanda de los recursos existentes y favorecer la biodiversidad en los nuevos humedales.

ECOLOGIS
Y CONSER

SMO
VACION



A inicios del siglo XVII, el filósofo y científico Francis Bacon escribió sobre la necesidad de controlar y manipular la naturaleza. A finales del siglo XVIII, en cambio, el vicario inglés Gilbert White escribía en favor de la coexistencia pacífica entre el hombre y el mundo natural, pero las nuevas locomotoras de vapor estaban causando ya los primeros estragos de la industrialización. La reacción contra esta daría más adelante gran ímpetu al movimiento conservacionista.

El primer análisis sistemático del impacto destructivo humano fue quizá *Man and nature*, de 1864, del diplomático estadounidense George Perkins Marsh. En él advirtió de que la deforestación causaría la formación de desiertos, y señaló que la escasez de recursos solía deberse a la actividad humana.

Renovable y limpia

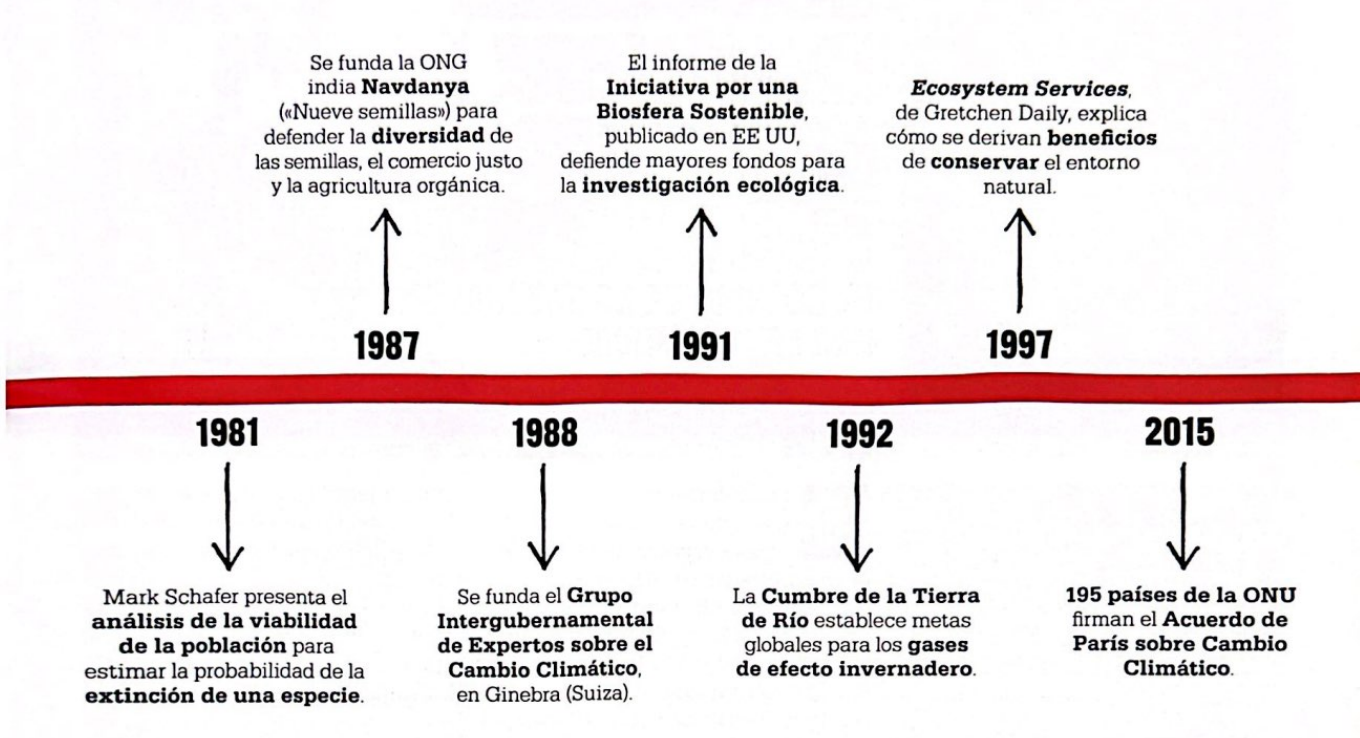
Antes de la revolución industrial, la mayor parte de la energía usada fue renovable: la energía del trabajo humano y animal, molinos de viento y agua, y leña sostenible. A partir de mediados del siglo XVIII se produjo el cambio drástico hacia el carbón, el combustible más eficiente para hornos y fábricas, pero había un precio: la contaminación asfixiante y el aumento aún desconocido de los gases de efecto invernadero.

En la década de 1880, el inventor estadounidense Charles Fritts ingenió una nueva forma de energía renovable, la célula fotovoltaica, que convertía la energía solar en electricidad. El industrial alemán Werner von Siemens vio enseguida su potencial para producir energía ilimitada, pero tardó un siglo en adoptarse de forma general. La energía hidroeléctrica «limpia» usó la primera fuente sostenible para generar electricidad a gran escala, y a finales del siglo XX se le unieron las energías eólica, mareomotriz, undimotriz y geotérmica.

Una ética ambiental

En 1937, tras el devastador Dust Bowl causado por la agricultura intensiva y la sequía en EE UU, el presidente Roosevelt escribió: «Una nación que destruye su suelo se destruye a sí misma». En 1949, el ecólogo y silvicultor estadounidense Aldo Leopold manifestó un tema recurrente del pensamiento medioambiental al defender una «ética de la tierra», es decir, una relación responsable entre la gente y su medio local.

Durante la posguerra, muchos gobiernos legislaron para garantizar la calidad del aire y el agua potable, y para establecer parques nacionales



y otras áreas protegidas. En 1968, el mundo halló su primera voz colectiva al celebrar la Unesco (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) la Conferencia de la Biosfera en París, que promovió la creación del Programa sobre el Hombre y la Biosfera tres años después.

Conciencia creciente

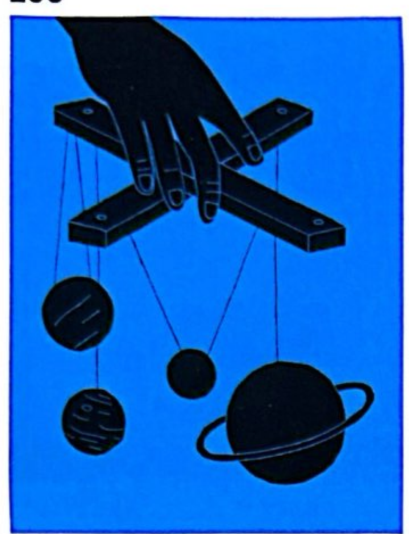
Fruto de la preocupación pública por el medio ambiente se crearon los grandes organismos de conservación. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza se fundó en 1948, seguida del Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Fund, WWF), en 1961, Amigos de la Tierra, en 1969, y Greenpeace, en 1971. Tras el vertido masivo de petróleo en Santa Bárbara (California), el senador estadounidense Gaylord Nelson propuso la idea de un evento nacional para poner de relieve las amenazas al medio. El primer día de la Tierra, celebrado el 22 de abril de 1970, marcharon millones de personas por todo EE UU. La escala del acontecimiento contribuyó a la aprobación de las leyes de aire y agua limpios y de especies en peligro, y condujo a la creación de la Agencia de Protección Ambiental de EE UU.

En 1973, el economista alemán Ernst F. Schumacher empleó la expresión «capital natural» en su éxito de ventas *Lo pequeño es hermoso*, al describir cómo los ecosistemas nos proporcionan servicios complejos. El concepto inspiró a la ambientalista estadounidense Gretchen Daily y a otros, todos ellos defensores de entender los ecosistemas como activos que, con la gestión adecuada, proporcionan bienes y servicios.

Cooperación internacional

Dos organismos de la ONU –la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente– crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 1988 para estudiar el riesgo del cambio climático por causas humanas.

El IPCC sigue vigilando el cambio climático. En 1992, la Cumbre de la Tierra organizada por la ONU en Río de Janeiro no tuvo precedentes ni por el tamaño ni por la amplitud de lo tratado. Fue el primero de una serie de encuentros internacionales que buscaron, con un éxito considerable, acuerdos globales sobre emisiones de gases de efecto invernadero. La cooperación internacional se considera hoy clave para salvar el medio ambiente de la Tierra. ■



EL HOMBRE DOMINA LA NATURALEZA SOLO POR EL CONOCIMIENTO

EL DOMINIO DE LA NATURALEZA POR LA HUMANIDAD

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Francis Bacon (1561–1626)

ANTES
***C.* 9500 A.C.** Primeros cultivos agrícolas en Oriente Próximo.

Década de 340 A.C. El filósofo griego Aristóteles crea una escala natural con el hombre en la cima.

Siglo XV Comienza la era de los descubrimientos: los europeos exploran el mundo en busca de recursos nuevos.

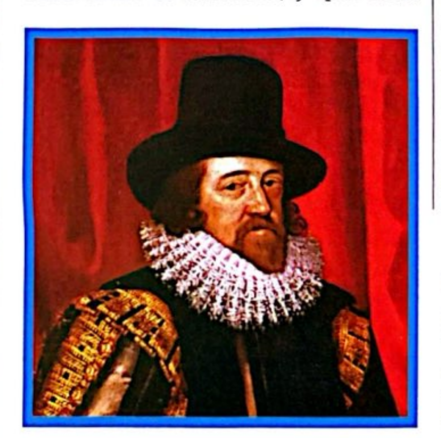
DESPUÉS
***C.* 1750** Arranca en Gran Bretaña la revolución industrial con tecnologías nuevas, como el motor de vapor.

1866 Gregor Mendel inaugura la ciencia de la genética, criando 22 variedades de guisantes.

Década de 1970 Tienen lugar los primeros experimentos de ingeniería genética, manipulando directamente el ADN.

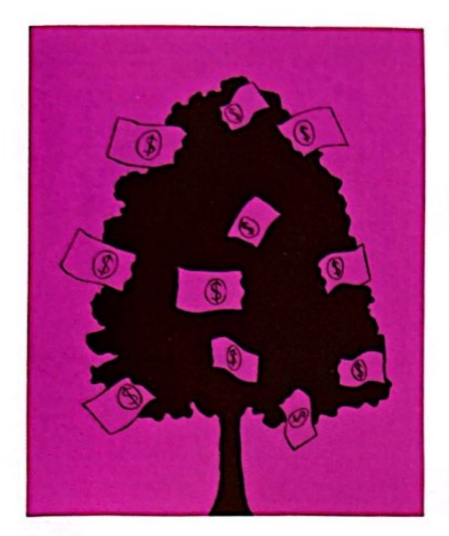
El Renacimiento, que tuvo lugar entre los siglos XIV y XVII, se asocia principalmente con el movimiento artístico y cultural que floreció en Europa, y con el que coincidieron los primeros desafíos a la autoridad de la Iglesia católica. Fue, asimismo, una época de avances científicos extraordinarios, que pueden considerarse como los inicios de una revolución científica. Los descubrimientos en campos como la astronomía, la física y la medicina dieron pie a la idea de que la ciencia podía revelar al hombre todo sobre el universo, y que este conocimiento convertiría al hombre en amo del mismo.

Muchos científicos de la época daban por supuesto que el ser humano ocupaba un lugar privilegiado en un universo creado por Dios para que lo habitara la humanidad. El filósofo, científico y pionero del desarrollo del método científico inglés Francis Bacon (1561–1626) respaldaba esta idea, al concebir un mundo natural que existía para proveer a la humanidad y para ser conquistado y explotado por ella. La postura de Bacon, posteriormente conocida como «ecología imperial» –en la que el fin de la ciencia y la tecnología es lograr el dominio sobre el mundo natural– fue la ideología que predominó a lo largo del Renacimiento, la Ilustración y la posterior revolución industrial de los siglos XVIII y XIX. ■



Francis Bacon posa para un retrato con toga parlamentaria. Tuvo una carrera política ilustre: nombrado caballero en 1603, sirvió como lord canciller de Inglaterra entre 1618 y 1621.

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Una perspectiva holística de la Tierra 210–211 ▪ Contaminación 230–235 ▪ Ética ambiental 306–307



LA NATURALEZA ES UN GRAN ECONOMISTA

LA COEXISTENCIA PACÍFICA DE LA HUMANIDAD Y LA NATURALEZA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gilbert White (1720–1793)

ANTES
Siglo IV A.C. El filósofo griego Diógenes defiende renunciar a las comodidades de la civilización por una vida acorde con la naturaleza.

1773 El naturalista William Bartram realiza estudios de campo de la vida salvaje del suroeste de EE UU, documentados en *Travels* (1791).

DESPUÉS
1949 Aldo Leopold, ecólogo estadounidense, explora en *A Sand County Almanac* la idea de la «ética de la tierra» o responsabilidad humana hacia la naturaleza.

1969 Se funda en EE UU –inicialmente como grupo antinuclear– Amigos de la Tierra, marcando el inicio del actual movimiento ecologista.

Los rápidos avances de la ciencia y la tecnología a finales del siglo XVIII iban a conducir a la industrialización y urbanización generalizadas, acompañadas del afán por controlar y explotar el mundo natural. Sin embargo, muchos, incluso en Gran Bretaña, el epicentro mismo del fenómeno, continuaban viviendo y trabajando en la propia tierra. De la clase rural instruida, en la cual se daba la fascinación tanto por la ciencia como por la naturaleza, surgió una nueva generación de naturalistas partidarios de aprender de los estudios científicos para vivir en armonía con el mundo natural, en lugar de para dominarlo.



Tras leer el *Selborne* de White, disfruté mucho de observar los hábitos de las aves, y empecé a tomar notas.
Charles Darwin



La Arcadia

En 1789, el párroco rural y naturalista Gilbert White publicó *Natural history and antiquities of Selborne*, semilla de lo que luego se llamaría en el mundo anglosajón «ecología arcadiana». Horticultor y ornitólogo formado en Oxford, White observó de cerca la vida salvaje de los alrededores de su aldea en Hampshire, y tomó notas minuciosas desde 1751. El libro, que reúne la correspondencia sobre sus hallazgos con varios naturalistas afines, era más que una mera colección de datos. El estilo cautivador, a menudo poético, de White transmitía un mensaje persuasivo de rechazo a la idea «imperial» de conquistar la naturaleza, y prefería un equilibrio entre el hombre y el mundo natural, como en la Arcadia de los antiguos griegos, que daría nombre al enfoque de White. ■

Véase también: Romanticismo, conservación y ecología 298 ▪ Ética ambiental 306–307 ▪ El movimiento verde 308–309 ▪ Detener el cambio climático 316–321



EN LO SALVAJE RESIDE LA CONSERVACION DEL MUNDO

ROMANTICISMO, CONSERVACIÓN Y ECOLOGÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Henry David Thoreau
(1817–1862)

ANTES
1662 Se presenta ante la Royal Society *Sylva*, del diarista inglés John Evelyn, en defensa de la conservación de los bosques.

1789 Gilbert White publica *Natural history and antiquities of Selborne*, que inspira la reacción contra la llamada «ecología imperial».

DESPUÉS
1872 El presidente Grant firma la ley que crea Yellowstone, el primer parque nacional de EE UU.

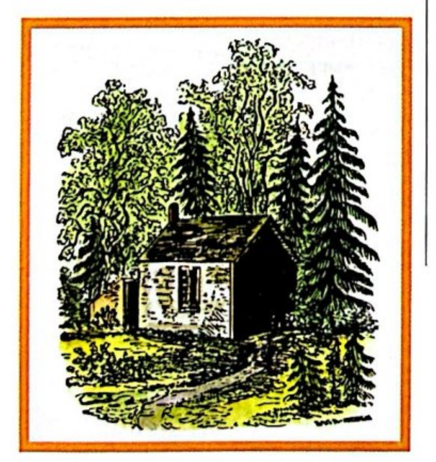
1892 El conservacionista escocés-estadounidense John Muir funda la organización ambientalista Sierra Club, en San Francisco.

1971 La Unesco lanza el Programa sobre el Hombre y la Biosfera.

De maneras diversas, el romanticismo, el nuevo movimiento cultural que surgió a finales del siglo XVIII, fue una reacción contra el racionalismo científico de la Ilustración. Mientras se asentaba la industrialización en las ciudades, los escritores, pintores y compositores celebraban el mundo natural. A la nueva clase media acomodada le atraían las representaciones románticas de la naturaleza y aficiones como el excursionismo o el montañismo. El movimiento romántico podía adoptar también actitudes científicas, por ejemplo, al inspirar interés por el campo naciente de la ecología y el ambientalismo.

El mundo salvaje

Henry David Thoreau, de Concord, Massachusetts (EE UU), fue una figura clave de la visión romántica de la naturaleza. En su libro *Walden* (1854), Thoreau cuenta el tiempo que pasó en una cabaña en el bosque junto al lago Walden Pond. Thoreau no defendía la conservación de la naturaleza en tanto ella misma, sino como un recurso necesario, para el sustento de la vida humana y un cierto enriquecimiento espiritual. Si bien la idea de «naturaleza» de Thoreau no estaba muy lejos de la vida moderna, su retrato romántico del mundo natural influyó en el movimiento conservacionista de EE UU, y también contribuyó a inspirar el sistema de parques nacionales. ■



La modesta cabaña de Thoreau en Walden Pond aparecía en la primera página de la edición de 1875 de *Walden*. Thoreau vivió allí para liberarse de las obligaciones de la vida urbana.

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Una perspectiva holística de la Tierra 210–211 ▪ La expansión urbana 282–283 ▪ El movimiento verde 308–309



EL HOMBRE ES EN TODAS PARTES UN AGENTE PERTURBADOR

DEVASTACIÓN HUMANA DE LA TIERRA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
George Perkins Marsh (1801–1882)

ANTES
1824 Joseph Fourier, físico francés, describe el efecto invernadero, identificado más tarde como factor del calentamiento global.

Década de 1830 Se cree que la colonización neerlandesa de Mauricio causó la extinción del dodo.

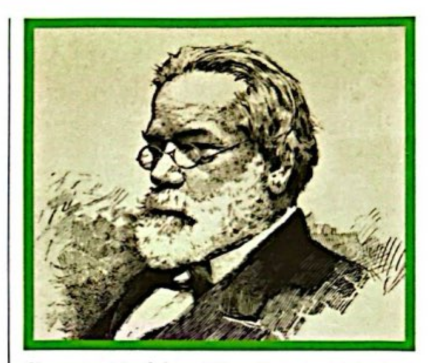
DESPUÉS
1962 En EE UU, *Primavera silenciosa*, de Rachel Carson, describe los efectos dañinos de los pesticidas sobre el medio.

1971 Ecologistas de EE UU fundan Greenpeace.

1988 Se constituye el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para estudiar el riesgo del cambio climático por causas humanas.

La opinión generalizada de que el mundo natural existía para ser explotado por la humanidad encontró una resistencia considerable en el movimiento ambientalista del siglo XIX. Naturalistas como Gilbert White esgrimieron los primeros argumentos en contra de la actitud «imperial» ante la naturaleza, prevaleciente desde los inicios de la era de la exploración global en el siglo XV, hallando eco en el ámbito sentimental del romanticismo. Tales ideas tendían a idealizar la naturaleza, más que a examinar el daño causado por la conquista humana del mundo natural.

Más allá de la reacción emotiva ante la modernidad, el polímata estadounidense George Perkins Marsh estudió el impacto humano sobre el medio, y propuso cambios. A Marsh le horrorizaban los efectos destructivos de la gestión de los recursos naturales. En *Man and nature, or, physical geography as modified by human action* (1864), señalaba en particular la deforestación masiva y la práctica desertización de algunas zonas de EE UU.



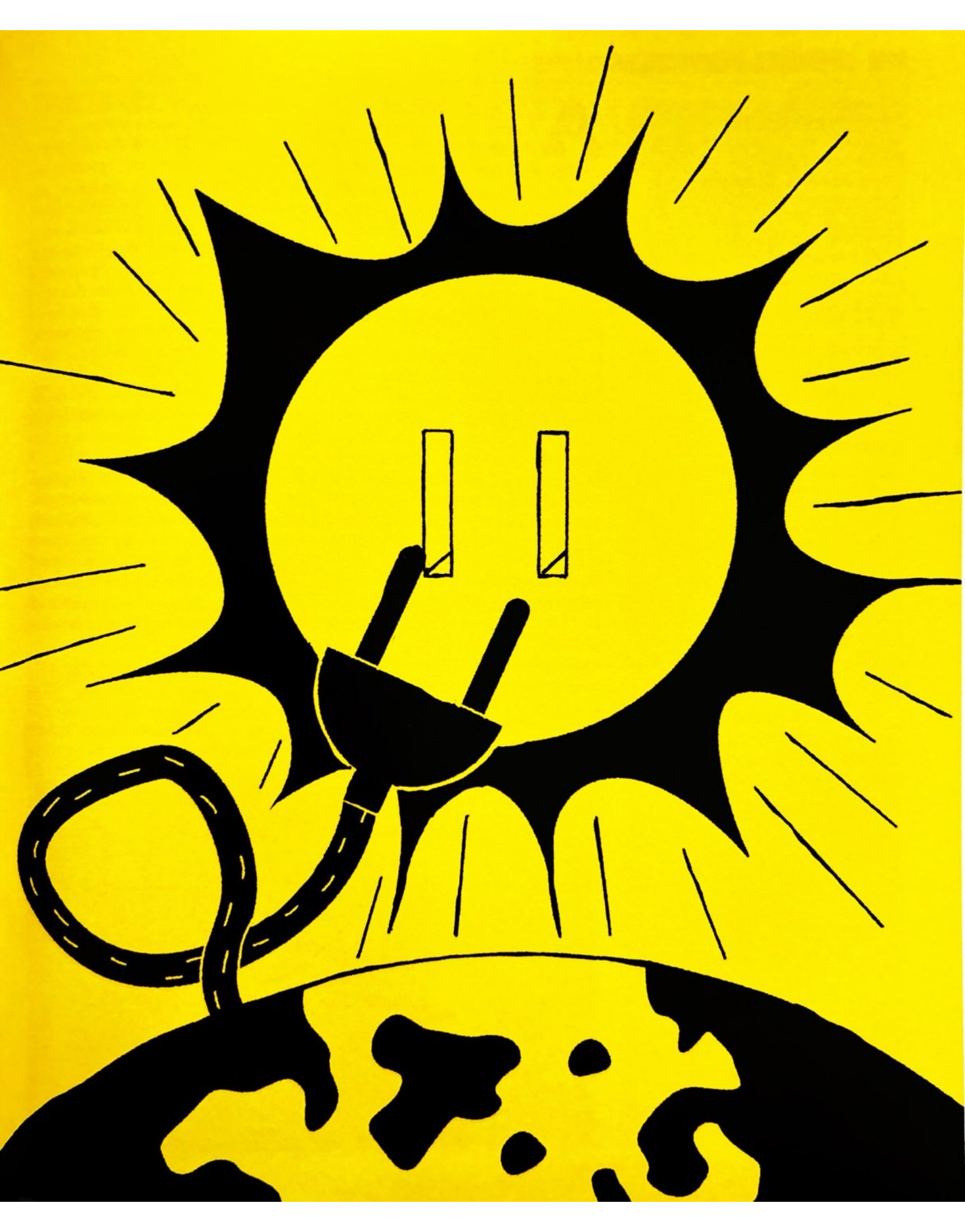
George Perkins Marsh, retratado aquí en un grabado de 1882. Además de activista de la conservación de la naturaleza, este nativo de Vermont (EE UU) fue filólogo, congresista, abogado y diplomático.

Marsh era partidario de concienciar del impacto destructivo humano, así como de encontrar nuevos modos de emplear los recursos naturales manteniendo el equilibrio natural. Activista, además de autor, contribuyó a establecer las áreas protegidas, e inspiró la idea de la gestión sostenible de los recursos, elemento central del movimiento ambientalista del siglo XIX. ■

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Un páramo de plástico 284–285 ▪ El dominio de la naturaleza por la humanidad 296 ▪ Ética ambiental 306–307

LA ENERGIA SOLAR ES ILIMITADA Y GRATUITA

ENERGÍAS RENOVABLES



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Werner von Siemens
(1816–1892)

ANTES
Siglo II A.C. Primeras ruedas hidráulicas, punto de inflexión del ahorro de trabajo en la historia de la tecnología.

1839 El físico francés Edmond Becquerel crea la primera célula fotovoltaica, que produce un voltaje débil a partir de la luz.

1873 El inventor francés Augustin Mouchot advierte del agotamiento de los combustibles fósiles.

1879 Se construye la primera central hidroeléctrica en las cataratas del Niágara (EE UU).

DESPUÉS
1951 Primera central nuclear conectada a la red, en Óbninsk (URSS).

1954 Los laboratorios Bell desarrollan en EE UU la primera célula fotovoltaica de silicio funcional.

1956 Marion King Hubbert, geólogo estadounidense, predice el declive de la producción petrolera después del año 2000.

1966 Primera planta mareomotriz en el río Rance, en Francia.

2018 La Agencia Internacional de la Energía predice que el consumo de energías renovables en el total global crecerá hasta el 12,4 % en 2023, una quinta parte más que en 2012–2017.

A finales del siglo XIX, en la Europa industrial crecía ya el temor a que el mundo no pudiera depender siempre de los combustibles fósiles. Cuando en 1883 el inventor estadounidense Charles Fritts construyó el primer panel funcional de células solares de selenio, el innovador industrial alemán Werner von Siemens reconoció el gran potencial de la energía renovable. «La energía solar no tiene ni límite ni coste», declaró. Con todo, al no comprender nadie cómo el selenio creaba fotoelectricidad, y no cumplirse el deseo de Siemens de que se realizaran más experimentos, no se desarrollaron las células solares hasta la década de 1950. Actualmente, la energía solar es la de más rápido crecimiento, y se predice que dominará el auge futuro de las renovables.

Combustibles renovables y fósiles

Las civilizaciones humanas usaron energías renovables hace ya milenios, por ejemplo, al quemar leña y al usar el viento para impulsar barcos por el mar. Las fuentes renovables, como la luz solar o la fuerza de las mareas, no se gastan con el uso.

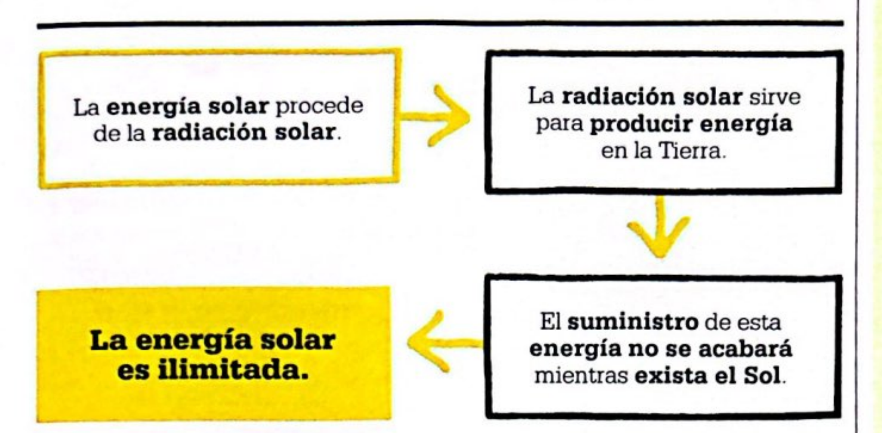
En cambio, los combustibles fósiles, como el carbón o el gas, han tardado miles de años en formarse, y, una vez consumidos, no se pueden reemplazar. El gas natural es un combustible fósil abundante, pero su extracción causa problemas ambientales, como temblores de tierra y contaminación del agua. La energía nuclear, aunque sostenible durante mucho tiempo, no se considera renovable, pues su producción requiere de uranio, un mineral abundante, pero de reservas limitadas en la Tierra.

Fuentes de energía como el sol, el viento y el agua son también por lo general «limpias»: a diferencia de los combustibles fósiles, emiten cero o muy pocos gases de efecto invernadero. Pero no todas las renovables son limpias. Por ejemplo, se ha quemado leña y boñiga de animales desde hace cientos de miles de años para obtener luz y calor; los árboles se pueden replantar, y los animales producen siempre excrementos, y es por tanto



La planta solar de Ivanpah, en el desierto de Mojave, en California, genera energía suficiente para suministrar a más de 140 000 viviendas en las horas punta del día.

Véase también: Calentamiento global 202–203 • Contaminación 230–235 • La reducción del ozono 260–261 • Agotamiento de recursos naturales 262–265



una práctica sostenible, pero tales combustibles emiten dióxido de carbono (CO_2), lo cual es una de las razones por las que no se clasifican como fuentes «alternativas», a diferencia de otras formas de energía renovable.

La energía renovable y limpia tendrá enormes beneficios a largo plazo para las poblaciones y los ecosistemas; reduce la contaminación, mitiga el cambio climático global, crea sostenibilidad y aumenta la seguridad energética de los países. Si el suministro se abarata lo suficiente, sacará a muchos de la pobreza. En unos treinta países, la energía renovable supone ya más del 20 % del suministro.

Energía solar

La energía del sol podría satisfacer con creces la demanda energética mundial. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) considera que, a corto plazo, es la energía renovable con mayor potencial. Su radiación se puede convertir directamente en electricidad por medio de células fotovoltaicas, como en los paneles solares en los tejados de los edificios, o indirectamente, por medio de lentes o espejos para crear calor, convertido después en electricidad, como en las centrales térmicas solares.

Los paneles solares instalados en tejados pueden calentar el agua para uso doméstico, y la luz solar, desalinizar agua por un proceso de evaporación empleado por primera vez por alquimistas árabes ya en el siglo XVI, y usado a escala industrial en Chile a finales del siglo XIX. En el mundo en vías de desarrollo, la desinfección solar está suministrando agua segura a más de dos millones de personas. El proceso consiste en matar los patógenos con calor y luz ultravioleta.

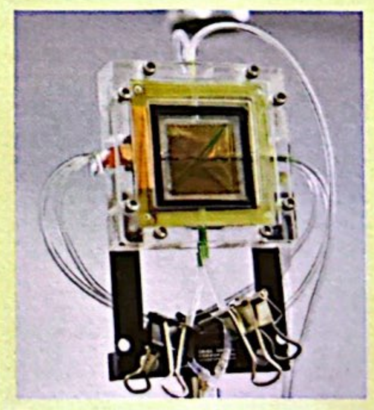
Energía eólica

Hace más de dos mil años que se construyeron los primeros molinos de viento para bombear agua y moler grano. Hoy, los parques eólicos en tierra o en el mar representan un 9 % aproximado del consumo de energías renovables. El rotor de las grandes aspas de los aerogeneradores está conectado a un eje que hace girar un generador para producir electricidad. La energía eólica es el área líder de crecimiento energético en Europa, EE UU y Canadá. En Dinamarca, casi el 50 % de la energía procede del viento, y en Irlanda, Portugal y España, el 20 %. El potencial global se cree que es unas cinco veces superior al nivel actual. »

Fotosíntesis artificial

Desde principios de la década de 1970 se está trabajando en el desarrollo de tecnología capaz de imitar la fotosíntesis y crear combustibles líquidos a partir de dióxido de carbono, agua y luz solar. Como estos tres recursos abundan, si se logra replicar el proceso, puede producir un suministro ilimitado y relativamente barato de combustible y electricidad limpios.

Hay dos pasos cruciales: desarrollar catalizadores que separen las moléculas de oxígeno e hidrógeno, y otros que conviertan el hidrógeno y el dióxido de carbono en un combustible denso, como el hidrógeno líquido, el etanol o el metanol. En la Universidad de Harvard se han utilizado hace poco catalizadores para separar agua en oxígeno e hidrógeno; el hidrógeno con dióxido de carbono servía de alimento a bacterias modificadas por bioingeniería que producen combustibles líquidos. El desafío es hacer de un experimento con éxito algo comercialmente viable.



Este generador de combustible solar imita la conversión en energía y oxígeno de la luz y el CO_2 del aire por las plantas.

Roca seca y caliente

Las fracturas naturales por las que aflora agua caliente a la superficie desde lo profundo de la roca son regalos de la energía geotérmica muy fáciles de explotar, pero raras en la mayor parte del mundo. La gran mayoría de la energía geotérmica bajo la superficie terrestre se encuentra en la roca seca y no porosa.

El sistema térmico mejorado, proceso similar a la fractura hidráulica, o *fracking*, para extraer gas natural y petróleo, trata de superar el problema fracturando estratos de roca con la inyección de agua a gran profundidad. El agua se calienta por contacto con la roca, y vuelve a la superficie por pozos de producción. Según los límites que ponga la economía a la profundidad, es una tecnología aplicable en gran parte del mundo, pero tiene sus riesgos. Como la fractura hidráulica, causa pequeños temblores de tierra, y no debe practicarse cerca de zonas pobladas o centrales energéticas.



[…] el viento, el sol y la propia tierra proporcionan combustible gratis, en cantidad prácticamente ilimitada.

Al Gore

Activista medioambiental y exvicepresidente de EE UU



Los parques eólicos solo son económicamente viables en lugares con viento regular; por tanto, su potencial no está igualmente repartido por el mundo. El viento suele ser más fuerte y regular en el mar que en tierra, y las turbinas flotantes generan energía en alta mar, a diferencia de las ancladas al lecho marino, que deben instalarse en aguas poco profundas cerca de la costa.

Energía geotérmica

El calor del interior de la Tierra procede tanto de la antigua formación del planeta como de la radiactividad de los materiales que contiene. Las aguas termales –donde el agua calentada geotérmicamente aflora a la superficie– han servido para bañarse desde el Paleolítico, y los romanos las usaban para calentar sus villas. Actualmente se utiliza para generar electricidad en al menos 27 países, con EE UU, Filipinas e Indonesia como mayores productores.

El calor geotérmico sirve para calentar directamente viviendas y carreteras en Islandia, y se está desarrollando la tecnología para usar agua geotérmica en plantas desalinizadoras. El único inconveniente de esta fuente de energía renovable es que se concentra junto a los límites entre placas tectónicas, donde el calor del manto terrestre asciende hasta la superficie. Su potencial es mucho mayor, pero perforar a gran profundidad es muy costoso.

Energía hidráulica

Como el agua es 800 veces más densa que el aire, incluso un flujo lento puede proporcionar una cantidad de

Las Tres Gargantas (China) es la mayor presa hidroeléctrica del mundo y se completó en 2012. Se ha criticado su impacto ambiental sobre el hábitat y la biodiversidad del Yangtsé, así como el riesgo de inundaciones y avalanchas.

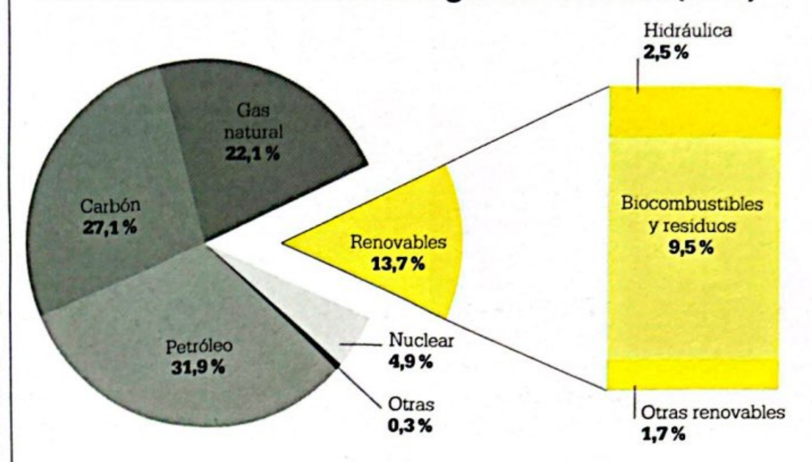


energía considerable si se logra controlar, por medio de presas o diques de marea que mueven turbinas conectadas a generadores. China es el mayor productor de energía hidroeléctrica, con 45 000 pequeñas instalaciones, además de construcciones colosales, como la presa de las Tres Gargantas, cuyas 32 turbinas tienen capacidad para producir 22 500 megavatios de electricidad. Un inconveniente de tales proyectos es que los embalses creados río arriba inundan tierras de cultivo productivas, lo cual obliga a la población a marcharse y altera los ecosistemas. Pese a ello, la AIE estima que la energía hidráulica representará el 16 % de la demanda eléctrica global en 2023.

La energía mareomotriz se basa en el mismo principio: el agua en movimiento mueve turbinas, y estas, a su vez, generadores eléctricos. Es una fuente de energía fiable que genera energía cada vez que la marea sube o baja, pero las instalaciones son caras de construir. Hoy, la mayor es la planta de energía mareomotriz del lago Sihwa, en Corea del Sur, completada en 2011, que redujo la cantidad de CO_2 que genera el país en 286 000 toneladas. La energía undimotriz (u olamotriz) consiste en aprovechar la energía de las olas mediante un convertidor. El primer plan comercial empezó en la costa oeste de Escocia en 2000, y el primer parque de aprovechamiento de varios generadores se inauguró en Aguçadoura (Portugal) en 2008.

> Algún día, la energía renovable será el único modo de satisfacer las necesidades energéticas.
>
> **Hermann Scheer**
>
> ***Presidente de la Asociación Europea de Energía Renovable***

Fuentes del suministro energético mundial (2016)



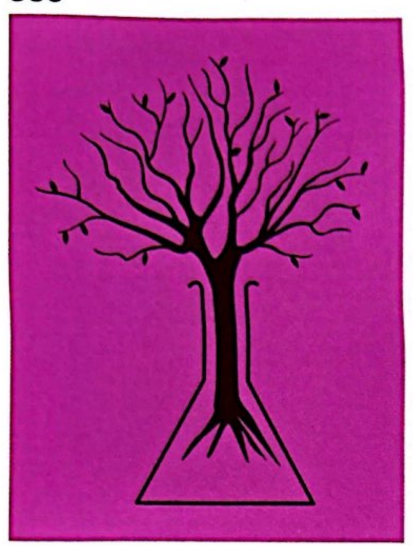
El gráfico ilustra las fuentes del total de energía producida y suministrada en el mundo en 2016, según los datos publicados por la AIE. En «Otras» figuran residuos no renovables y fuentes no incluidas en otros apartados, como pilas combustibles.

Biomasa

La materia orgánica de plantas o animales se conoce como biomasa. Esta contiene energía acumulada, ya que las plantas absorben la energía solar necesaria para su crecimiento en la fotosíntesis, y los animales la absorben de las plantas que comen o de lo que consumen sus presas. Crear un combustible renovable a partir de desechos vegetales, animales y humanos como paja y estiércol puede parecer una opción atractiva, y algunas centrales termoeléctricas de carbón se han reconvertido para quemar madera. La combustión de la biomasa produce calor, electricidad y combustibles para transportes, como el etanol o el biodiésel. No obstante, la biomasa no produce necesariamente energía limpia, pues su combustión libera CO_2, con la consiguiente contaminación del aire y por partículas. Despejar bosque primario para obtener madera o plantar cultivos de biomasa daña el medio ambiente; quizá por ello, la biomasa es más común en países que no pueden permitirse otras opciones renovables. Según la AIE, la mayor parte del suministro de biocombustibles sólidos en 2016 se usó en África, a la que corresponde el 33,2 %.

El futuro

Mientras crecen las energías renovables, hay que sopesar las ventajas y efectos adversos de cada una, desde la contaminación por biomasa hasta la muerte de aves migratorias por las aspas de los aerogeneradores. En 2014, la AIE predijo que las renovables proveerían el 40 % de las necesidades globales de energía en 2040, y en 2018, que supondrían casi un tercio de la electricidad mundial en 2023, correspondiendo la mayor parte a la energía solar. La energía de las corrientes oceánicas podría generar también mucha electricidad, al igual que instalaciones extensas de paneles solares en el espacio o flotando en el mar. ■



HA LLEGADO LA HORA DE QUE LA CIENCIA SE OCUPE DE LA TIERRA

ÉTICA AMBIENTAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Aldo Leopold (1887–1948)

ANTES
1894 En *The mountains of California*, el naturalista John Muir describe sus viajes por las montañas de California, evocando la espiritualidad y sensación de aventura que allí sintió.

1909 Gifford Pinchot defiende, en *The ABC of conservation*, que las generaciones futuras deben poder emplear los recursos naturales de la Tierra.

DESPUÉS
1968 Paul R. Erlich y su esposa Anne Erlich publican *The population bomb*, que advierte del peligro del crecimiento de la población humana.

1970 Se celebra el primer Día de la Tierra en EE UU, el 22 de abril, y se convierte en celebración anual global de la educación y la reforma ambientales.

En lo esencial, la ética ambiental extiende el ámbito de la ética más allá de la esfera humana, para incluir el mundo natural. Obliga a los seres humanos a plantearse el papel que desempeñan en el medio ambiente, su responsabilidad hacia el planeta, y su deber para con las generaciones futuras.

El campo de la ética ambiental surgió de la urgencia de una crisis inminente, expresada en escritos tanto académicos como populares. En 1962, el libro *Primavera silenciosa*, de la bióloga y conservacionista estadounidense Rachel Carson, documentaba la gravedad del impacto de los pesticidas en el medio ambiente, y lograba llevar estas cuestiones al primer plano del debate público en EE UU. Seis años después, el artículo del ecólogo Garett Hardin «The tragedy of the commons» exponía el peligro de la sobreexplotación de recursos compartidos, y señalaba el riesgo de permitir que la población humana creciera sin control.



Lo que está bien es lo que tiende a preservar la integridad, estabilidad y belleza de la comunidad biótica, y lo que está mal, lo que no.
Aldo Leopold



Otros autores consideraron la crisis desde una perspectiva más filosófica. La ética de la tierra de Aldo Leopold, expuesta en *A Sand County Almanac* (1949), colocaba a los seres humanos en condiciones de igualdad con otras especies dentro de un ecosistema más amplio. Como parte de un todo mayor, nuestras inquietudes éticas deberían considerar la salud del ecosistema entero, y no el mero progreso exclusivo de la salud y del bienestar humanos.

En la fecunda conferencia de 1966 «The historical roots of our ecologic crisis», luego publicada en forma de artículo, el historiador estadounidense Lynn White afirmaba que la crisis medioambiental era una consecuencia de la visión occidental del mundo, y culpaba en particular al pensamiento cristiano por su carácter antropocéntrico, expresado en ideas

Véase también: Hábitats en peligro 236–239 ▪ El legado de los pesticidas 242–247 ▪ Agotamiento de recursos naturales 262–265 ▪ Servicios ecosistémicos 328–329



El valle subalpino de Mineral King sobrevivió a la amenaza del desarrollo. Sigue siendo un ecosistema para beneficio de todos, conforme a la «ética de la tierra» de Aldo Leopold.

como que los seres humanos son superiores a todas las demás criaturas o que la naturaleza fue creada para uso y aprovechamiento del hombre.

Dilemas éticos

La ética ambiental se ocupa de los imperativos morales de la sostenibilidad y la administración, y examina si las motivaciones responden al antropocentrismo o a la protección del mundo natural porque este lo merezca de modo inherente. Estas cuestiones han sido objeto de debate en ámbitos no solo filosóficos, sino también legales y políticos.

En 1969, el grupo de presión medioambiental Sierra Club denunció un permiso concedido por el Servicio Forestal de EE UU a Walt Disney Enterprises para prospectar el valle californiano de Mineral King, donde Disney quería construir un complejo de esquí. El valle no tenía carácter protegido más allá de su condición de coto de caza, pero el Sierra Club mantenía que debía mantenerse la zona en su estado original. El pleito llegó hasta el Tribunal Supremo, que en 1974 dictaminó a favor del Servicio Forestal y de Disney. Para entonces, sin embargo, Disney había perdido interés, y hoy el valle forma parte del Parque Nacional de las Secuoyas.

La batalla entre los partidarios de los enfoques éticos antropocéntrico y ecocéntrico continúa. A menudo tiene lugar en el ámbito político, sobre todo dada la mayor actualidad de cuestiones globalmente sensibles como la del cambio climático. El desarrollo sostenible ha sido por lo general un empeño antropocéntrico, por considerar las necesidades de las generaciones futuras; los defensores de la ética ambiental mantienen que la sostenibilidad solo es viable si preserva el futuro de todos los miembros del ecosistema. ■



Aldo Leopold

Nacido en 1887, Aldo Leopold se crió en Burlington (Iowa). Tras licenciarse en la Escuela de Estudios Forestales de Yale trabajó en el Servicio Forestal de EE UU. Allí tuvo un papel destacado en la propuesta de declarar área silvestre el Parque Nacional de Gila, que, en 1924, se convirtió en la primera área silvestre oficial de EE UU. Se trasladó a Wisconsin, donde continuó trabajando para el Servicio Forestal. En 1933, Leopold asumió la cátedra de Gestión Cinegética en la Universidad de Wisconsin. Murió en 1948 mientras ayudaba a apagar un incendio en una pradera. La mayoría de sus numerosos ensayos sobre historia natural y conservación se publicaron de forma póstuma en colecciones, como *A Sand County Almanac*, que tuvo una gran influencia sobre el emergente movimiento ecologista.

Obras principales

1933 *Game management.*
1949 *A Sand County Almanac.*
1953 *Round river: from the journals of Aldo Leopold.*
1991 *The river of the Mother of God and other essays.*



PIENSA GLOBALMENTE, ACTUA LOCALMENTE

EL MOVIMIENTO VERDE

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
David Brower (1912–2000), **Petra Kelly** (1947–1992)

ANTES
1892 El conservacionista escocés-estadounidense John Muir funda el Sierra Club en San Francisco (California).

1958 Los ecologistas protestan contra los planes para construir una central nuclear en Bodega Bay (California).

DESPUÉS
1970 El 22 de abril se celebra el primer Día de la Tierra en EE UU.

1972 Se presentan candidatos ecologistas a las elecciones en Tasmania (Australia), Nueva Zelanda y Suiza.

1996 Ralph Nader se presenta a la presidencia de EE UU por el Partido Verde.

Las raíces del ecologismo, o del actual «movimiento verde», se remontan a organizaciones establecidas a finales del siglo XIX y principios del XX, como el Sierra Club. Ante la amenaza de la urbanización y la industrialización crecientes, el Sierra Club tenía el propósito de proteger los entornos naturales para el disfrute de la gente. Una mayor conciencia de la relación de los seres humanos con el medio ambiente condujo al surgimiento de un movimiento ecologista más políticamente activo en la segunda mitad del siglo XX, que despegó en la década de 1960, en plena guerra fría, cuando la crisis de los misiles de Cuba llevó a EE UU y la URSS al borde del conflicto nuclear, lo cual empujó a muchos activistas a realizar llamamientos al desarme.

En ese contexto, de la idea de conservar parajes particulares, como en los sistemas de parques nacionales estadounidenses y europeos, se pasó a un concepto mucho más amplio de la ecología, y surgieron varias organizaciones con programas de fuerte componente activista, expresado en protestas masivas y acción directa.



Solo con el cuidado del medio ambiente se puede mantener el sustento de quienes más dependen de él.
Petra Kelly



Protesta organizada

Una de las primeras organizaciones activistas fue Amigos de la Tierra; fundada en 1969 con el fin de impedir la construcción de centrales nucleares, entre sus promotores estaba el conservacionista David Brower, antiguo dirigente del Sierra Club. Políticamente activa desde sus inicios, Amigos de la Tierra continúa presionando a gobiernos de todo el mundo, realizando campañas sobre cuestiones ambientales muy diversas y haciendo hincapié en la importancia del desarrollo económico sostenible. En 1971, un pequeño grupo de activistas norteamericanos formó el comité Don't Make a Wave

Véase también: Ciencia ciudadana 178–183 ▪ El legado de los pesticidas 242–247 ▪ Devastación humana de la Tierra 299 ▪ Detener el cambio climático 316–321



Un bote con activistas patrulla ante dos barcos británicos que transportan tóxicos ilegales, parte de las protestas regulares de Greenpeace.

(«No hagáis una ola») para protestar contra las pruebas nucleares de EE UU en la isla de Amchitka, en Alaska. La organización prefería la acción directa, y fletaron un barco para ir a la isla como acto de protesta. La publicidad generada por el grupo se ganó a la opinión pública, y las pruebas se suspendieron. Fue la primera de las acciones de lo que luego se convertiría en Greenpeace, organización que sigue recurriendo a la acción directa para desafiar a quienes realizan prácticas dañinas para el medio.

Política verde

Durante la década de 1970 surgieron partidos políticos con programas ecologistas en varios países. El Partido de la Ecología británico se fundó en 1975 (renombrado como Partido Verde en 1985), y el Partido Verde alemán, en 1979. Conforme el movimiento ganaba impulso, muchos partidos ecologistas menores comenzaron a coaligarse en partidos verdes nacionales unificados.

En los últimos años, al cobrar protagonismo en las noticias asuntos como la contaminación y el cambio climático, otros partidos han adoptado políticas más favorables al medio ambiente. ■



Tenemos todo lo que necesitamos, salvo, quizá, voluntad política. La voluntad política, eso sí, es un recurso renovable.
Al Gore





Petra Kelly

Nacida Petra Lehmann en 1947 en Günzburg (Alemania Occidental), Petra tomó luego el apellido de su padrastro, oficial del Ejército de EE UU. Cuando tenía doce años, la familia se mudó a EE UU, donde Kelly estudió ciencias políticas en Washington, D. C. En 1970, Kelly volvió a Europa. Mientras trabajaba en la Comisión Europea en Bruselas, se afilió al Partido Socialdemócrata de Alemania, pero le desilusionó la política tradicional. Lideró una lista verde en las elecciones europeas de 1979, y cofundó el Partido Verde en 1980, que en 1983 logró 27 escaños en el Parlamento federal alemán. Como parlamentaria, hizo campaña sobre cuestiones ambientales y de derechos humanos. En 1992 fue hallada muerta junto con su compañero, el exmilitar y político verde Gert Bastian, en su casa, en Bonn, al parecer por un pacto de suicidio.

Obras principales

1984 *Luchar por la esperanza.*
1992 *Nonviolence speaks to power.*
1994 *Thinking green: essays on environmentalism, feminism, and nonviolence.*



LAS CONSECUENCIAS DE LOS ACTOS DE HOY EN EL MUNDO DE MAÑANA

EL PROGRAMA SOBRE EL HOMBRE Y LA BIOSFERA

EN CONTEXTO

ORGANIZACIÓN CLAVE
Unesco

ANTES
1925 Se establece en París el Comité Internacional de Cooperación Intelectual para el intercambio de ideas y la mejora de la calidad de vida.

1945 La Conferencia de las Naciones Unidas establece la constitución de la Unesco.

DESPUÉS
1983 Primer Congreso Internacional de Reservas de la Biosfera, en Minsk (Bielorrusia, en la URSS).

1995 Se acuerda el marco estatutario de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera.

2015 La ONU lanza la iniciativa 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

2017 EE UU retira 17 lugares de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera, pero añade otros 23 nuevos.

Durante la segunda mitad del siglo xx, hubo una conciencia global creciente de la importancia de la relación entre los seres humanos y el mundo natural. Fruto de ello fue la creación en 1971, por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), del Programa sobre el Hombre y la Biosfera (MAB), un programa intergubernamental por el desarrollo sostenible y equitativo y la protección de los ecosistemas naturales.

Fundada después de la Segunda Guerra Mundial, la Unesco adoptó como misión «consolidar la paz, erradicar la pobreza y lograr el desarrollo sostenible y el diálogo intercultural mediante la educación, las ciencias, la cultura, la comunicación y la información», y se encontraba en una situación única para estudiar atentamente la relación entre la humanidad y el medio.

Una red global

La organización empezó por establecer una serie de lugares protegidos internacionalmente reconocidos, la denominada Red Mundial de Reservas de la Biosfera (WNBR, por

La humanidad está **alterando el medio** con procesos como la **deforestación** y la **urbanización**.

Tales **actos** tienen **consecuencias**.

Los datos obtenidos de las **reservas globales del MAB generan un cuadro** de las posibles consecuencias.

El programa MAB predice las consecuencias de los actos de hoy para el mundo de mañana.

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ La coexistencia pacífica de la humanidad y la naturaleza 297 ▪ Energías renovables 300–305 ▪ Ética ambiental 306–307 ▪ Iniciativa por una biosfera sostenible 322–323

sus siglas en inglés), cuyo cometido es mostrar cómo la diversidad cultural y biológica son mutuamente beneficiosas, favorecer la integración equilibrada de la población con su medio natural y buscar maneras de gestionar los recursos naturales de modo eficiente para beneficio del medio y de sus habitantes.

En 2018 había 686 reservas designadas en el mundo, que sirven de plataforma para estudios conjuntos científicos y culturales en diversos ecosistemas marinos, costeros y terrestres. A través de la red, el programa observa los efectos de la actividad humana sobre la biosfera, con especial atención al cambio climático, y favorece el intercambio de información.



Unas mujeres marroquíes cosechan los salutíferos frutos del argán (o erguén). La población local se ocupa de mantener estos árboles de la Reserva de la Biosfera del Arganeraie.

Conocimiento local

El Programa sobre el Hombre y la Biosfera contempla tres funciones interconectadas en una reserva de la biosfera: conservación, desarrollo sostenible y apoyo a través de formación y prácticas. Los objetivos se logran delimitando áreas para proteger núcleos vitales en las reservas, proporcionando al mismo tiempo lugares para el desarrollo adecuado y sostenible de la población local. Con este fin, se anima a las comunidades a participar en la gestión de las reservas, así como a utilizar su conocimiento de la zona para el aprovechamiento óptimo de los recursos.

La idea de educar sobre el medio ambiente y compartir conocimientos en toda la Red Mundial de Reservas de la Biosfera resulta fundamental para el éxito del proyecto en su conjunto.

Opiniones en conflicto

Las reservas de la WNBR, aparte de su importancia científica internacional, son con frecuencia de interés cultural para los Estados interesados. No las designa la Unesco, sino los gobiernos nacionales, y permanecen bajo la jurisdicción del Estado donde se hallen, cuyos derechos no se ven afectados por el reconocimiento internacional de su condición de reservas de la biosfera.

En los últimos años, algunos Estados han decidido gestionar algunos lugares como reservas nacionales en lugar de internacionales, retirándolos del programa, pero aun así no ha dejado de crecer el número de lugares designados para el mismo por gobiernos de todo el mundo. ■

Unesco

La Unesco, organismo de la ONU con sede en París (Francia), fue fundada en 1946 para promover la cooperación internacional por la paz y la seguridad a través de la educación, la ciencia y la cultura, conforme a la Carta de las Naciones Unidas. En la actualidad, la Unesco cuenta con 195 Estados miembros.

La Unesco continúa la labor iniciada por el Comité Internacional de Cooperación Intelectual, de la Sociedad de Naciones, en la década de 1920, interrumpida por el estallido de la Segunda Guerra Mundial. Hoy día, los miembros tratan de cumplir los objetivos fijados por medio del patrocinio de programas científicos y educativos y para promover y proteger los derechos humanos y el desarrollo sostenible, y favorecer así la diversidad cultural.

La organización es quizá más conocida por establecer lugares declarados Patrimonio de la Humanidad, a fin de preservar en lo posible la diversa herencia cultural y natural del mundo.

PREDECIR EL TAMAÑO DE UNA POBLACION Y SUS PROBABILIDADES DE EXTINCION

ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE POBLACIONES

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Mark L. Shaffer (n. 1949)

ANTES
1964 La UICN publica la primera Lista Roja de especies de mamíferos y aves amenazadas.

1965 En *The destruction of California*, Raymond Dasmann relata la rápida pérdida de flora y fauna en dicho estado.

1967 *The theory of island biogeography*, de Robert MacArthur y Edward O. Wilson, estudia los patrones insulares de inmigración y extinción.

DESPUÉS
2003 El análisis de viabilidad de poblaciones (AVP) de la mariposa azul de Fender sirve de guía a la conservación en EE UU.

2014 Se realizan AVP en el desierto de Sonora (EE UU) para evaluar la respuesta de aves y reptiles al cambio climático.

El análisis de viabilidad de poblaciones (AVP, o PVA, en inglés), o evaluación de riesgo de extinción, es un proceso para estimar la probabilidad de que una especie objetivo sea capaz de mantenerse durante un tiempo dado. Un rasgo clave del AVP es la definición de tamaños mínimos de población viables y áreas mínimas de hábitat, información esta que resulta útil para la toma de decisiones sobre prioridades de conservación.

Útiles conservacionistas

El AVP combina la estadística y la ecología para calcular el menor nú-

Véase también: Resiliencia ecológica 150–151 ▪ Comunidad clímax 172–173 ▪ Metapoblaciones 186–187 ▪ Extinciones masivas 218–223



La mariposa azul de Fender se creyó extinguida hasta su redescubrimiento en 1989. Sobreviven pequeñas poblaciones en peligro en el noroeste de Oregón.

mero de organismos necesario para que una especie sobreviva en el largo plazo en su hábitat idóneo. Este número mínimo dicta también la extensión de hábitat adecuado que la especie necesita. El análisis de viabilidad de poblaciones es una herramienta útil para los conservacionistas a la hora de presionar a los gobiernos y promotores para declarar protegida una zona, ya que sirve para explicar precisamente por qué el hecho de reducir la extensión de un bosque, brezal o cañaveral amenaza a una flora o fauna dadas. Proteger un área lo bastante extensa para mantener a una especie grande beneficia también a muchos organismos menores que comparten el mismo medio.

Hay animales que solo pueden vivir en medios donde la irrupción humana es mínima. Esto es especialmente cierto para animales que viven en hábitats especializados, como ciertos tipos de búho en bosques primarios, reptiles en brezales ácidos o anfibios en corrientes rápidas y no contaminadas. A medida que crece la población humana, sin embargo, es constante la demanda de tierra destinada a construir, a cultivar, al ocio, a carreteras o a la silvicultura. Esta presión amenaza sobre todo a las especies que no pueden adaptarse a otros lugares. Cuando están ya confinadas en «islas» de hábitat apropiado, poco daño ambiental o interferencia humana bastan para llevarlas a situaciones de peligro de extinción.

Contar osos grizzly

En 1975, el número de osos grizzly estaba menguando en el Parque Nacional de Yellowstone. Se creía que quedaban 136, y esta población se consideraba en peligro. Como parte de su tesis doctoral, Mark L. Shaffer empezó a estudiar la sostenibilidad a largo plazo de esta población geográficamente aislada de osos grizzly. Este pionero del análisis de viabilidad de poblaciones aplicó cuatro factores que consideró decidirían el destino de los osos. El primero es la estocasticidad demográfica: las fluctuaciones irregulares e impredecibles del número, la edad, el sexo y las tasas de natalidad y mortalidad. Por ejemplo, si la gran mayoría de los »



La incertidumbre viene a ser la única certeza en el AVP.

Steven Beissinger

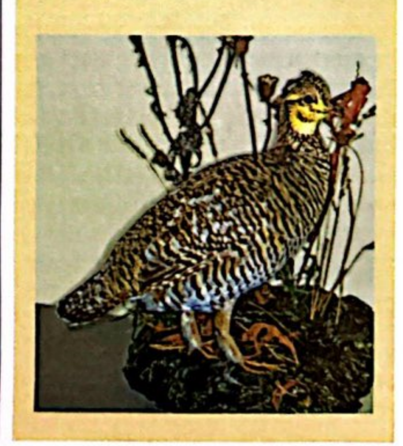
Biólogo de la conservación estadounidense



Vulnerabilidad de las poblaciones pequeñas

Una población mínima viable debe ser suficiente para mantenerse en circunstancias normales, así como para lograr sobrevivir a episodios extremos. Mark Shaffer lo comparaba con un embalse construido para soportar una inundación que pueda ocurrir cada cincuenta años, pero no una devastadora inundación de las que pueden darse una vez cada siglo.

Las poblaciones pequeñas resultan muy vulnerables a amenazas múltiples sucesivas. En la Nueva Inglaterra (EE UU) de la época colonial abundaban las gallinas del brezo. Su incesante caza para alimento o por deporte había reducido drásticamente su número en 1908, año en que se declaró protegida la última población superviviente en la isla de Martha's Vineyard. Un gran incendio durante la temporada de cría de 1916, la endogamia, varios inviernos severos y la depredación intensa por parte de las aves de presa redujeron la población de gallinas del brezo por debajo de un nivel viable. En 1927 solo quedaban dos hembras, y la especie se extinguió en 1932.



Una osa grizzly y sus oseznos buscando comida en Yellowstone. A lo largo de su vida, las hembras tienen un área de campeo de 775–1400 km². Entre los machos puede alcanzar los 5000 km².

animales en una población son machos, el éxito reproductivo será menor que en una población más equilibrada, y esto influirá en las probabilidades de supervivencia. El segundo factor es la estocasticidad ambiental: las fluctuaciones impredecibles de las condiciones ambientales, como cambios de hábitat y clima, que afectan a la disponibilidad de alimento y refugio. El tercero son las catástrofes naturales; y el cuarto, los cambios genéticos, como los problemas debidos a la endogamia. Los modelos estadísticos determinan un rango de posibilidades para cada uno de estos factores.

Desde los estudios iniciales de Shaffer en las décadas de 1970 y 1980 y las estrategias de gestión y conservación subsiguientes, los grizzly han extendido su hábitat más del 50 % dentro del Gran Ecosistema de Yellowstone, un área de 89 031 km² que contiene el parque nacional. En 2014, el Servicio Geológico de EE UU estimó que vivían unos 757 osos en ese ecosistema, basándose en 119 avistamientos de madres y oseznos. Sin embargo, la población cayó a 718 en 2018, y los autores de los modelos de población consideraron que Yellowstone pudo haber alcanzado su capacidad de carga máxima –el mayor número de animales que puede mantener un área de hábitat adecuado. En 2017, los osos grizzly fueron brevemente retirados de la lista de especies amenazadas, pero un juez federal les devolvió la protección en 2018.



La tecnología está permitiendo cada vez más a científicos y legisladores observar la biodiversidad del planeta y las amenazas que sufre.

Stuart L. Pimm

Biólogo británico-estadounidense




Cómo se realizan los estudios

Hoy se realizan análisis de viabilidad de poblaciones (AVP) de varios tipos. El más simple es el AVP de serie temporal, que contempla una población entera a lo largo de un periodo de tiempo determinado para calcular una tendencia de crecimiento aproximada y posibles variaciones. En tales estudios, todos los individuos tienen idéntica consideración.

Los AVP demográficos suelen ser más precisos y detallados. Se basan en tasas reproductivas y de supervivencia estimadas para distintas franjas de edad de una población. Estos análisis requieren muchos más datos, pero pueden aportar información extra sobre las necesidades y la

Se **identifica** una **población amenazada**.

Un **análisis de viabilidad de poblaciones** sirve para **evaluar la situación**.

Se busca una **solución** para **combatir la amenaza** que sufre la población.

Es posible que la población se recupere.



Los zorros isleños de las Islas del Canal, en California, eran menos de 200 a fines de la década de 1990, y superaban los 5000 en 2015, pero en una de las islas hay una subpoblación amenazada.

vulnerabilidad de secciones distintas de la población, justificando medidas de protección si es necesario. Como no siempre hay disponibles datos fiables sobre franjas de edad y tasas reproductivas en poblaciones pequeñas amenazadas, los ecólogos usan a veces datos de otras poblaciones de la misma especie, u otra distinta pero similar. Los resultados son variables, sin embargo, incluso en poblaciones de la misma especie en la misma zona. En un estudio de 2015 de tres colonias de lobos marinos de California en el golfo de California, se usaron los datos de una de las colonias para hacer predicciones sobre las otras dos; resultaron válidas para una de estas, pero no para la otra.

Intervenir con éxito

Se están refinando aún los métodos, pero el análisis de viabilidad de poblaciones (AVP) es ya una piedra angular de la biología de la conservación. Se ha aplicado a poblaciones tan diversas como zorros isleños en California, nutrias marinas en Alaska, mariposas azules de Fender en Oregón y delfines nariz de botella cerca de las costas de Argentina y Australia. Con el desarrollo de programas informáticos cada vez más eficientes y un número mayor de variables, los AVP se usarán con mayor eficacia en el futuro. Es imposible predecir todas las extinciones, pero los AVP aportan herramientas para identificar poblaciones en peligro, determinar las medidas más eficaces para mejorar su viabilidad y conservar especies en peligro. ■

Un estudio japonés

La perdiz nival japonesa vive en los Alpes Japoneses, a una altura de hacia 2500 m. La población, de unas dos mil aves, se divide en varias comunidades pequeñas, en diversos picos. Cuando el calentamiento global atrajo a los depredadores a alturas mayores, se temió por la supervivencia de la perdiz nival. El ecólogo Ayaka Suzuki y su equipo se propusieron averiguar la población mínima viable de perdices en el monte Norikura. El equipo reunió datos de población, como el número de crías hembras que sobrevivían hasta la temporada de cría siguiente, así como la tasa anual de supervivencia de todas. Los cálculos incluían variables para la descendencia de cada pareja.

Los hallazgos indicaron que el riesgo de extinción en los próximos 30 años era relativamente bajo, aun en el caso de que la población inicial fueran quince. Una conclusión posible es que la población del monte Norikura es suficiente para nutrir las poblaciones en declive que viven en otros picos.



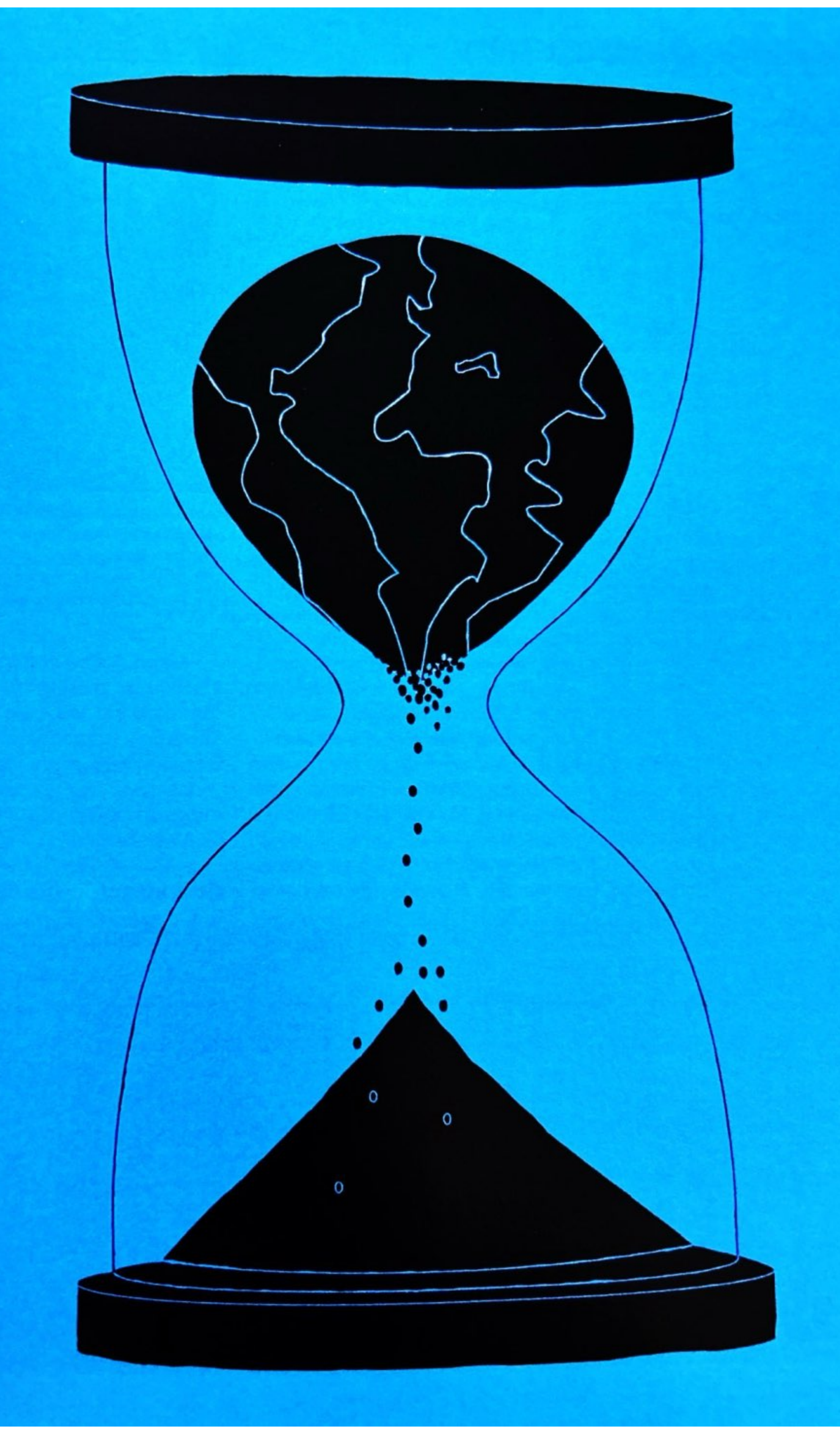
El análisis de viabilidad de poblaciones puede indicar la urgencia de las medidas para recuperar poblaciones específicas.

William F. Morris
Biólogo estadounidense



EL CAMBIO CLIMATICO ESTA OCURRIENDO AQUI Y AHORA

DETENER EL CAMBIO CLIMÁTICO



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVE
Bert Bolin (1925–2007), **Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático** (desde 1988)

ANTES
1955 El científico Gilbert Plass concluye que las concentraciones mayores de CO_2 causarán temperaturas mayores.

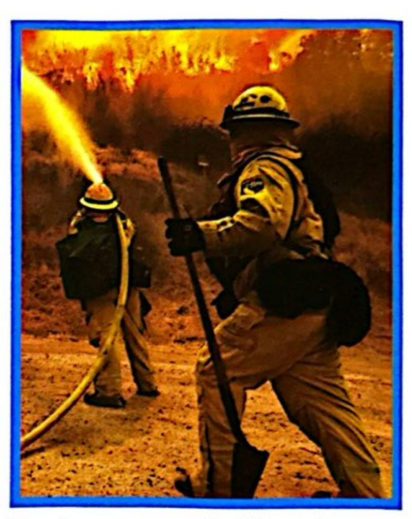
1957 El científico estadounidense Roger Revelle y el físicoquímico austriaco Hans Suess publican un informe conjunto demostrando que los océanos no absorberán el exceso de CO_2 atmosférico.

1968 El glaciólogo británico John H. Mercer predice un aumento drástico del nivel del mar en los próximos cuarenta años al fundirse el inlandsis antártico.

DESPUÉS
2020 Fecha de entrada en vigor de los planes del Acuerdo de París para combatir el cambio climático.

Desde la revolución industrial, los seres humanos están alterando el medio natural de la Tierra con emisiones crecientes de dióxido de carbono (CO_2). Las sociedades se han vuelto más tecnológicamente avanzadas, pero la tecnología usada –desde los trenes, los barcos y las fábricas que quemaban carbón hasta los automóviles y aviones cuyo combustible deriva del petróleo– ha tenido un impacto dañino en el mundo natural y las especies que lo habitan. Al crecer la conciencia de las causas humanas del cambio climático entre los científicos, se formaron grupos de estudio por todo el mundo para estudiar el fenómeno y proponer modos de detener, si no corregir, el daño.

Los efectos del cambio climático son variados. A medida que la acumulación de CO_2 en la atmósfera hace aumentar la temperatura global, esto causa la fusión del hielo polar, la subida del nivel y el calentamiento de los océanos y la extinción de las especies no adaptadas a aguas más cálidas. También están cambiando los patrones climáticos globales: los huracanes en la región del Atlántico Norte han ganado en intensidad, causando muerte y devastación a su paso. Se ha incrementado la frecuencia de los incendios y las sequías en las regiones áridas, y zonas del mundo ya sujetas a catástrofes por episodios climáticos extremos, como las afectadas por los monzones, están sufriendo unas consecuencias más severas, en términos de pérdida de vidas humanas y de hábitat.



Bomberos apagando el llamado «fuego santo» que asoló el condado de Orange, en California, en 2018. Las mayores temperaturas propiciaron una temporada de incendios larga y difícil.

Cooperación global

Los científicos son conscientes de que la actividad humana contribu-

Causas naturales:
- Erupciones volcánicas
- Movimientos tectónicos
- Corrientes oceánicas

Causas humanas:
- Deforestación
- Prácticas agropecuarias
- Uso de combustibles fósiles
- Emisiones industriales



... aumentan los niveles de dióxido de carbono atmosférico y causan el cambio climático.

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Deforestación 254–259 ▪ El Programa sobre el Hombre y la Biosfera 310–311 ▪ Iniciativa por una biosfera sostenible 322–323 ▪ El impacto económico del cambio climático 324–325

ye al cambio climático desde 1896, cuando el sueco Svante Arrhenius afirmó que quemar combustibles fósiles influye en el calentamiento global. Sin embargo, los gobiernos no tomaron medida alguna al respecto hasta la década de 1970. Para entonces, el conocimiento del fenómeno había llegado a la opinión pública por la prensa y la televisión, que difundieron las sombrías perspectivas de los climatólogos entre el público no especializado.

Los esfuerzos internacionales por detener o retrasar el cambio climático empezaron con la primera Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, en Estocolmo (Suecia), en 1972. Se prestó una atención escasa al cambio climático en comparación con otros asuntos medioambientales –como la contaminación y las energías renovables–, pero sí se creó el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), organismo encargado de supervisar políticas y programas ambientales tales como la gestión de ecosistemas, la ayuda a las víctimas de desastres naturales y las medidas contra la contaminación. El PNUMA fue responsable más adelante de coordinar los esfuerzos de la ONU para combatir el cambio climático.



[…] los seres humanos están realizando un experimento geofísico a gran escala de una clase que no pudo darse en el pasado […].
Roger Revelle y Hans Suess

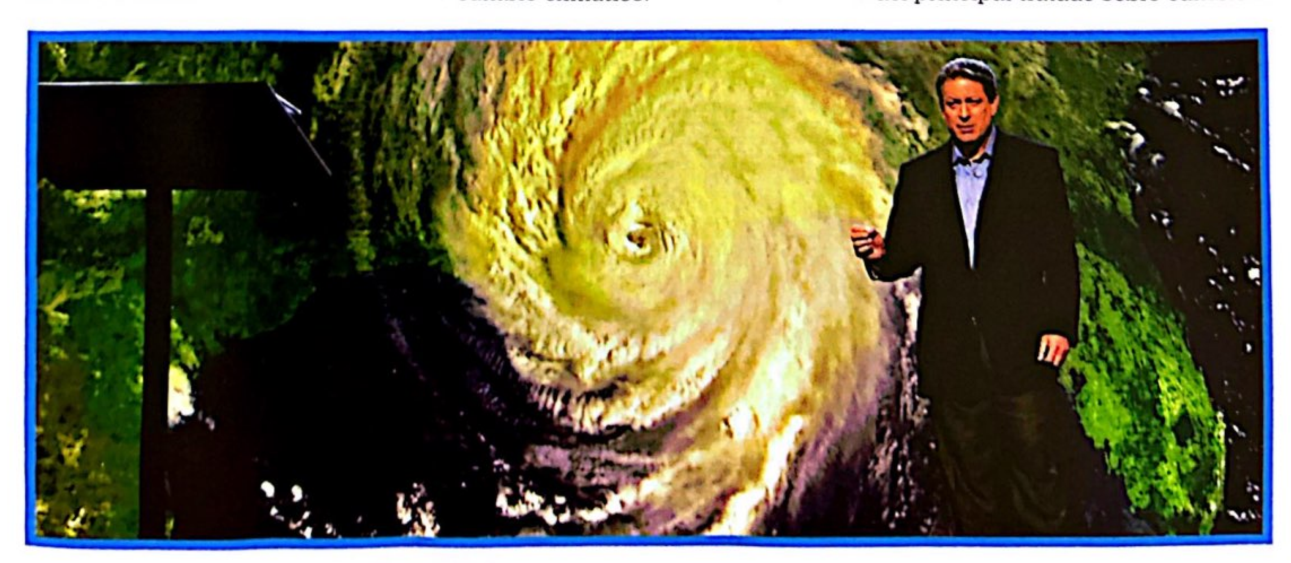


En 1987, los miembros de la ONU acordaron el Protocolo de Montreal, con el compromiso de proteger la capa de ozono de la Tierra poniendo fin al uso de sustancias dañinas. Aunque no fue pensado específicamente para combatir el cambio climático, el acuerdo, ratificado por todos los Estados miembros, redujo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Creación del IPCC

En 1988, dos organismos de la ONU –el PNUMA y la Organización Meteorológica Mundial– formaron en Ginebra (Suiza) el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). El meteorólogo sueco Bert Bolin, miembro del Grupo asesor sobre gases de efecto invernadero al que sustituyó el IPCC, fue su primer presidente.

El IPCC fue creado como respuesta globalmente coordinada al cambio climático vinculado a la actividad humana. Emite informes basados en estudios científicos, como apoyo del principal tratado sobre cambio »



Una verdad incómoda, documental de 2006 sobre el cambio climático del exvicepresidente de EE UU Al Gore, tenía como objetivo educar sobre las causas y los efectos del cambio climático.

climático, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, firmada en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro (Brasil) en 1992. La labor del IPCC consiste también en publicar el «Resumen para políticos», que informa a gobiernos de todo el mundo sobre las amenazas para las personas y el medio derivadas del cambio climático.

El Protocolo de Kioto

En 1997, nueve años después de la creación del IPCC, los miembros de la ONU firmaron el Protocolo de Kioto para mejorar la normativa sobre emisiones globales de CO_2. Fue el primer acuerdo entre países para obligar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero país por país, con el fin de limitarlas a niveles que no tengan un impacto adverso sobre los ecosistemas del mundo.

El Protocolo de Kioto se firmó en 1997, pero no entró en vigor hasta 2005. Al final del primer periodo de vigencia en 2012, todos los países firmantes habían logrado sus objetivos, salvo Canadá, que se retiró del protocolo al no ser capaz de cumplirlo. Tampoco Australia redujo sus emisiones, pero, en el periodo inicial, su objetivo era un aumento del 8 %. La mayoría de los países están en vías de cumplir sus objetivos para 2020, salvo Noruega, que se había fijado el objetivo muy ambicioso de una reducción de entre el 30 y el 40 % de los niveles de 1990.

París y el futuro

El Protocolo de Kioto fijó objetivos para su cumplimiento entre 2005 y 2020. Después de 2020, los países signatarios acatarán un nuevo protocolo, el Acuerdo de París. En noviembre de 2016, tras décadas de llamamientos a resoluciones globales más agresivas contra el cambio climático, el acuerdo fue firmado por 195 miembros de la Convención Marco en la sede de la ONU, en Nueva York. Como en Kioto, el objetivo principal del Acuerdo de París es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a los niveles acordados.

Con la decisión de Siria de firmar el Acuerdo de París en 2017, EE UU se convirtió en el único país del mundo que no participó en él. EE UU lo había firmado durante la presidencia de Barack Obama, pero su sucesor Donald Trump lo rechazó, afirmando que pedía demasiado a EE UU y demasiado poco a otros países. La decisión fue un golpe para los demás signatarios, ya que, además de tener riqueza sobrada para financiar la investigación sobre el



Reunión subacuática del gabinete de Maldivas en 2009 como llamamiento para la toma de medidas contra el cambio climático. La subida del nivel del océano podría tragarse el archipiélago entero.

La negación del cambio climático

A pesar del consenso científico mayoritario en todo el mundo en que el cambio climático tiene causas humanas y requiere acción urgente, varios de los países más poderosos de la Tierra persisten en negar que exista tal cambio climático. Algunos han llamado «industria de la negación» a la oposición a los datos del cambio climático, fomentada por medios de comunicación e industrias que se benefician de una normativa ambiental laxa, y que crean un ambiente de incertidumbre y escepticismo en torno a lo afirmado por los climatólogos. El escepticismo procede en parte de quienes dicen que las estimaciones de los científicos son demasiado alarmistas, y que el calentamiento es más lento de lo que se predijo. Otros creen que el cambio climático antropogénico es un engaño, y que se debe a un ciclo natural del planeta, no al comportamiento humano. En cualquier caso, la negación del cambio climático por algunos líderes políticos y empresariales es una postura que el IPCC y los científicos siguen desacreditando.

clima, EE UU es el segundo mayor emisor mundial de gases de efecto invernadero. Posteriormente, el presidente Trump aclaró su postura afirmando que cree que el cambio climático es un fenómeno natural, y que puede volver a cambiar en sentido inverso sin afectar mucho al comportamiento humano.

Otros países han expresado su preocupación por el Acuerdo de París. El gobierno de Nicaragua, que firmó el acuerdo en 2017, lo criticó por no ir lo bastante lejos, pues no reducirá las emisiones a tiempo de evitar un desastre climático global. El Acuerdo de París carece de mecanismos para garantizar que los firmantes cumplan sus términos.

Medidas desesperadas

Según los términos del Acuerdo de París, los países deben trabajar juntos para limitar el aumento de la temperatura media global a menos de 2 °C por encima de los niveles preindustriales. Se pretende ir más allá, proponiendo que el aumento debe limitarse a 1,5 °C. En un estudio publicado en la revista *Earth System Dynamics* en 2016, el climatólogo Carl-Friedrich Schleussner y su equipo mantenían que un aumento de 1,5 °C crearía un entorno global reflejo de las máximas temperaturas actuales, pero que uno de 2 °C daría lugar a un «nuevo régimen climático» no experimentado antes en la historia de la humanidad.

Estudios posteriores mostraron que el objetivo de 1,5 °C será difícil de cumplir. En 2018, el IPCC publicó un informe especial sobre el calentamiento global, como preveía el Acuerdo de París, y sus hallazgos eran alarmantes. En lugar de tender al objetivo de 1,5 °C, el mundo va más bien hacia los 3 °C por encima de los niveles preindustriales. Corregir esto y cumplir con el objetivo supondría tomar medidas drásticas sin precedentes. Las emisiones antropogénicas globales de CO_2 tendrían que caer un 45 % en 2030 con respecto a los niveles de 2010, y llegar al cero neto en 2050, es decir, lograr emisiones nulas.

El informe de 2018 del IPCC apelaba también a los individuos para que contribuyeran a reducir las emisiones de CO_2. El uso de la tierra, la energía, las ciudades y la industria son las áreas principales en las que el IPCC mantiene que son necesarios cambios: hay que utilizar coches eléctricos, caminar más e ir en bicicleta con más frecuencia, y volar menos, ya que los aviones emiten una cantidad importante de gases de efecto invernadero. El IPCC animaba también a comprar menos leche, carne, queso y mantequilla, ya que una demanda menor de estos productos reduciría las emisiones de las industrias cárnica y láctea. Acuerdos globales como los de Kioto y París han dominado los titulares, pero en la actualidad está claro que hay que aplicar todos los métodos posibles para reducir las emisiones de CO_2. ■

La carga del cambio

Debe llegarse cuanto antes al pico de emisiones de gases de efecto invernadero, para revertir la tendencia.

Los países desarrollados liderarán la reducción de las emisiones de CO_2.

Hay que atender las pérdidas sufridas por los países vulnerables al cambio climático.

Los países desarrollados darán ayuda financiera a los países en desarrollo.

Por el Acuerdo de París, firmado por 195 países miembros de la Convención Marco, los países desarrollados se comprometen a ayudar a otros sin fondos o recursos para combatir solos el cambio climático.



Hemos puesto a los gobiernos ante opciones bastante duras. Hemos señalado los enormes beneficios de limitarse a 1,5 °C.

Profesor Jim Skea

Copresidente del grupo de trabajo III del IPCC





LA CAPACIDAD PARA SUSTENTAR LA POBLACION MUNDIAL

INICIATIVA POR UNA BIOSFERA SOSTENIBLE

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Jane Lubchenco (n. 1947)

ANTES
1388 El Parlamento de Inglaterra declara ilegal tirar residuos a los ríos y las acequias públicas.

Década de 1970 El científico británico James Lovelock y la microbióloga estadounidense Lynn Margulis desarrollan la hipótesis Gaia.

DESPUÉS
1992 El ecólogo canadiense William Rees introduce el concepto de huella ecológica, referente al impacto humano sobre el medio ambiente.

2000 Paul Crutzen, químico neerlandés galardonado con el Nobel, populariza la idea de que el mundo ha entrado en una nueva época geológica, el Antropoceno, que refleja el impacto enorme y a menudo peligroso de la humanidad sobre el planeta.

La Iniciativa por una Biosfera Sostenible (SBI, por sus siglas en inglés) surgió en 1988 de los esfuerzos de la Sociedad Ecológica de América (ESA) por establecer las prioridades de una financiación adecuada para la investigación científica. El campo de la ecología estaba entonces en transición hacia la ciencia aplicada, es decir, el uso del conocimiento para hallar soluciones prácticas a los problemas medioambientales. La ecóloga estadounidense Jane Lubchenco dirigía la SBI, y allanó el camino para que la ESA y otros organismos promovieran el conocimiento ecológico útil, mientras los científicos se esforzaban por combatir la degradación medioambiental.



La SBI ha estimulado mejoras en la comprensión y el favorecimiento de los vínculos entre el conocimiento ecológico y la sociedad.
Jane Lubchenco



Priorizar el planeta

Los científicos de la SBI iniciaron un camino nuevo del campo de la ecología, y determinaron las áreas de investigación más relevantes en los años venideros. Dieron prioridad a tres campos de estudio: el cambio global, la diversidad biológica y los sistemas ecológicos sostenibles. Los estudios del cambio global tienen por objeto la atmósfera, el clima, el suelo y el agua (incluidos los cambios debidos a la contaminación), así como las modalidades de explotación de la tierra y el agua. Los estudios de la diversidad biológica se centran en la conservación de especies amenazadas y en el análisis de los cambios naturales y antropogénicos en la diversidad genética y de hábitat. Por último, el estudio de los sistemas ecológicos sostenibles analiza las interacciones entre los seres humanos y los procesos ecológicos, para que se puedan hallar soluciones a las tensiones detectadas en los ecosistemas.

La SBI insistía en la necesidad de disponer de fondos para estos estudios, y también en la importancia de compartir los hallazgos con la

Véase también: Cambio de población caótico 184 ▪ La hipótesis Gaia 214–217 ▪ Sobrepesca 266–269 ▪ Detener el cambio climático 316–321 ▪ El impacto económico del cambio climático 324–325 ▪ Gestión de residuos 330–331

sociedad en general, más allá de la comunidad científica. Planteó un proceso para los estudios ecológicos aplicados consistente no solo en adquirir nuevos conocimientos, sino también en comunicarlos y tratar de incorporarlos en políticas efectivas.

El futuro de la investigación

Lubchenco y sus colegas crearon la SBI como declaración de su misión y como argumento en favor de una atención y financiación mayores para los estudios ecológicos. El informe publicado en 1991 en la revista *Ecology*, con el título «The Sustainable Biosphere Initiative: an ecological research agenda», fue bien recibido entre la comunidad científica, y se ha adaptado para su uso a escala global, primero en la Iniciativa por una Biosfera Sostenible, desarrollada en México en 1991, y después en el Programa 21, el plan de acción adoptado en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en 1992.

Desde 1991, la SBI y su informe han influido a una generación de ecólogos, abriendo nuevas vías de financiación y cooperación, formando comités, realizando talleres y generando informes para lograr sus metas. La SBI ha llevado la ecología a la atención del público, y hoy los ecólogos están presentes en los cuerpos asesores, influyendo en las políticas de empresas y gobiernos.

Pese a las mejoras, Lubchenco no cree que los cambios realizados hayan estado a la altura de los peligros a los que se enfrenta la Tierra. Nuevas campañas, como la Earth Stewardship Initiative de 2013, de la ESA, continúan la labor de la SBI, esperando lograr cambios mayores en las próximas dos décadas, para que el desarrollo sostenible satisfaga las necesidades humanas actuales sin comprometer las de las generaciones futuras. ■



Unos estudiantes escuchan una explicación sobre un aerogenerador. La SBI promueve la educación ecológica para instruir en la gestión y el mantenimiento de la biosfera.

Jane Lubchenco



La aclamada científica ambiental y ecóloga marina Jane Lubchenco se crió en Denver (Colorado). Obtuvo el grado en biología en la Universidad de Colorado, seguido de un máster en zoología, y luego se doctoró en ecología marina en Harvard. Sus estudios se centran en la interacción entre los seres humanos y el medio ambiente, con atención especial al cambio climático, la biodiversidad y la sostenibilidad oceánica.

Entre 2009 y 2013, Lubchenco fue subsecretaria de Comercio para los Océanos y la Atmósfera, y directora de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), a cuya cabeza fue la primera mujer y el primer ecólogo marino. En 2011 supervisó la creación de Weather-Ready Nation, un proyecto para preparar al público para episodios climáticos extremos.

Obras principales

1998 «Entering the century of the environment: a new social contract for science», *Science*.
2017 «Delivering on science's social contract», *Michigan Journal of Sustainability*.



ESTAMOS JUGANDO A LOS DADOS CON EL MEDIO NATURAL

EL IMPACTO ECONÓMICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
William Nordhaus (n. 1941)

ANTES
1993 En *Reflections on the economics of climate change*, William Nordhaus resume los problemas del cambio climático y la economía, destacando las incertidumbres y posibles soluciones.

DESPUÉS
2008 En *Common wealth: economics for a crowded planet*, Jeffrey Sachs mantiene que la humanidad se enfrenta a crisis alarmantes –incluido el cambio climático–, pero que tenemos los conocimientos para hacerles frente.

2013 En *The climate casino: risk, uncertainty, and economics for a warming world*, William Nordhaus explica la relación entre calentamiento global y economía y aporta ideas para reducir su impacto.

L climatología es una ciencia incierta: las proyecciones futuras cambiarán, influidas por la actividad humana, las nuevas tecnologías y los ciclos naturales. Es de vital importancia, sin embargo, evaluar el impacto económico del cambio climático. Una vez se hayan comprendido los costes, se puede estudiar el modo de mitigar los impactos directos. Es necesario considerar no solo los costes directos –tales como los daños a la propiedad en inundaciones o incendios–, sino también los costes con efectos de ámbito mayor, como la pérdida de biodiversidad, la destrucción de hábitats, el adelanto de las estaciones de crecimiento y las migraciones humanas forzosas.

Evaluar el coste

El llamado «coste social del carbono» (CSC, o SCC, en inglés) es una estimación económica del daño causado a la sociedad por cada tonelada adi-



Protesta en Lamu (Kenia) en 2018, contra la construcción de una central eléctrica de carbón. La conciencia creciente del daño al medio ambiente ha despertado la desaprobación popular.

Véase también: Energías renovables 300–305 ▪ El Programa sobre el Hombre y la Biosfera 310–311 ▪ Detener el cambio climático 316–321

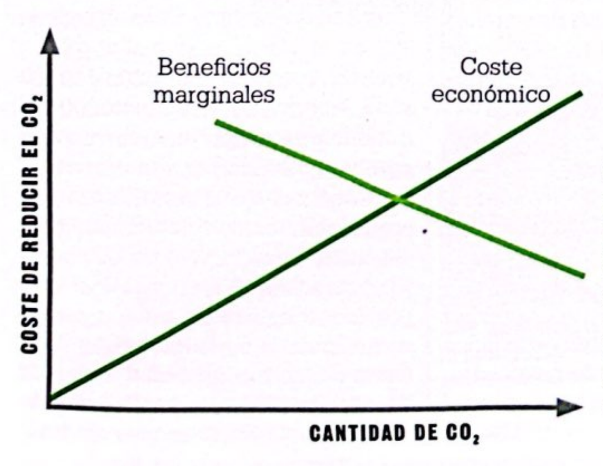
cional de CO_2 emitida a la atmósfera. Entre los daños se incluyen pérdidas de productividad agrícola, daños a infraestructuras, costes energéticos y efectos perjudiciales para la salud humana. El CSC sirve como punto de partida para el cambio de las políticas energéticas. Por ejemplo, si se tiene en cuenta el CSC en las propuestas para construir una nueva central energética, el coste de construirlas resulta muy superior. Esto podría volver también más económicamente viables los costes de las energías alternativas. Calcular el CSC, sin embargo, es muy difícil.

Modelos de predicción

Los economistas usan varios modelos para calcular el CSC. En 1999, William Nordhaus desarrolló el modelo regional integrado del clima y la economía (RICE), variante de su anterior modelo dinámico integrado del clima y la economía (DICE), que valoraba los costes y beneficios de ralentizar el calentamiento global. El RICE integra las emisiones de dióxido de carbono, su concentración en la atmósfera, el cambio climático, los daños y los controles fijados para reducir emisiones. El modelo divide el mundo en regiones para su análisis, y predice que el CSC combinado en 2055 será de entre 44 y 207 dólares por tonelada de dióxido de carbono emitido, dependiendo de la tasa de calentamiento y de las medidas aplicadas para mitigarlo.

Los modelos económicos incorporan supuestos como las tasas de descuento. Estas priorizan el presente sobre el futuro, pues este último no puede predecirse con exactitud. La tasa se determina en función del equilibrio entre prioridades presentes y futuras: unas tasas de descuento altas indican que las poblaciones futuras serán más ricas y estarán más preparadas para hacer frente al cambio climático; unas tasas bajas, en cambio, apuntan a que el cambio climático empobrecerá a las sociedades del futuro. Nordhaus proponía una tasa de descuento del 3 %, es decir: si los daños económicos debidos al cambio climático van a ser 5 billones de dólares en 2100, se podrían invertir 382 000 millones de dólares hoy para evitarlo. ■

Análisis de los costes de reducir el dióxido de carbono



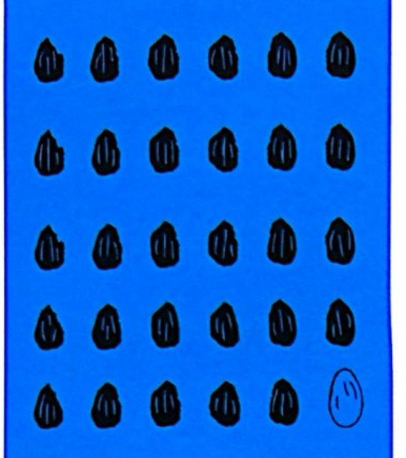
El coste de reducir el CO_2 aumenta en función de la cantidad, pero esto se compensa con los beneficios. Las líneas se cortan en el punto de equilibrio, donde se obtienen los mayores beneficios al menor coste.

William Nordhaus

William Nordhaus, nacido en Albuquerque (EE UU) en 1941, es un líder de la economía del cambio climático, campo al que llegó al compartir oficina con un climatólogo. Sus teorías económicas –los modelos DICE y RICE– se usan ampliamente en los análisis para tomar decisiones políticas. Una de sus mayores preocupaciones es poner un precio realista al CO_2. Hoy en día, el coste social del CO_2 se estima en unos 40 dólares por tonelada, pero, según Nordhaus, debería ser mayor, para tener en cuenta los impactos del cambio climático. Nordhaus es catedrático Sterling de Economía en la Universidad de Yale, y miembro del grupo de expertos económicos de la Oficina de Presupuesto del Congreso y del grupo Brooking sobre actividad económica. En 2018 recibió el premio Nobel de Economía.

Obras principales

1994 *Managing the global commons: the economics of climate change.*
2000 *Warming the world: economic models of global warming.*



LOS MONOCULTIVOS Y MONOPOLIOS DESTRUYEN LA COSECHA DE SEMILLAS

DIVERSIDAD DE SEMILLAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Vandana Shiva (n. 1952)

ANTES
1966 Una nueva variedad de arroz de alto rendimiento llamada IR8 permite un gran aumento de la producción en varios países. Introducido primero en Filipinas, se lo llamó «arroz milagroso».

DESPUÉS
1994 Firma del Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual, anexo del Acuerdo por el que se fundará la OMC en 1995.

2004 Tras las protestas de los agricultores que la desarrollaron, se revoca la patente de Monsanto sobre la variedad de trigo Nap Hal.

2012 La organización india Navdanya International lanza la campaña mundial Seed Freedom para proteger la soberanía y la seguridad alimentarias.



El arroz en California es de alto rendimiento, pero hay problemas de salinidad del suelo. La tolerancia a la sal se puede lograr genéticamente, pero las variedades tradicionales pueden tenerla de forma natural.

En 1987, en respuesta a cambios en la agricultura y la producción de alimentos, la activista ecofeminista india Vandana Shiva inició un movimiento para proteger la diversidad nativa de semillas al fundar Navdanya, una ONG para proteger la biodiversidad agrícola de la ingeniería genética y las patentes.

Agrobiodiversidad

La biodiversidad agrícola, o agrobiodiversidad, es el resultado de la cría selectiva, a lo largo de miles de años, de plantas silvestres y animales salvajes, de donde procede la diversidad genética de las diferentes variedades de cultivos y animales domesticados. Una hierba del género *Oryza* se cultivó por primera vez como un tipo de arroz en Asia hace entre 8200 y 13500 años; hoy existen más de 40000 variedades de arroz. Intrínsecas a la agrobiodiversidad son las especies no cosechadas que contribuyen a la producción, como microorganismos del suelo, depredadores de las plagas y polinizadores. A lo largo de los tiempos, las técnicas y los conocimientos de millones de agricultores han dado forma a esta biodiversidad. Desde la década de 1960, la transferencia de tecnología al mundo en vías de desa-

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ El legado de los pesticidas 242–247 ▪ Servicios ecosistémicos 328–329



Las patentes de semillas amenazan la libertad y supervivencia mismas de los campesinos.
Vandana Shiva



rrollo incluyó variedades de cereales de alto rendimiento, combinadas con fertilizantes químicos, pesticidas y herbicidas, mecanización e irrigación más eficiente. La llamada revolución verde desplazó el foco de la agricultura en el mundo en desarrollo desde la biodiversidad hacia el mayor rendimiento de las cosechas. Nuevas variedades como el «arroz milagroso» (IR8) hicieron aumentar la producción, pero había una desventaja: cuanto más se generalizaban unas pocas variedades productivas, más se reducía la base genética de las semillas de variedades tradicionales de grano, patatas, frutas, verduras y algodón.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, se ha perdido el 75% de la biodiversidad de los cultivos en los campos del mundo. Algunos ambientalistas afirman que las variedades tradicionales son más compatibles con las condiciones de cultivo locales, más baratas para los agricultores y más sostenibles para el medio que las nuevas variedades de alto rendimiento. Además, muchas de estas variedades están bajo la patente de las empresas que las crearon. Los acuerdos comerciales imponen normativas sobre quién puede usar qué, perjudicando a los pequeños agricultores y beneficiando a las empresas agrícolas que producen las semillas.

Soberanía alimentaria

Según Shiva, las explotaciones rurales están amenazadas si no está ya disponible la semilla adecuada. Tradicionalmente, la mayoría de los agricultores a pequeña escala guardan semilla de una cosecha para la siguiente. Hoy, cuando compran semillas –sobre todo si son de transgénicos–, suelen tener que comprometerse a no guardarlas; y comprar semillas a una empresa todos los años les perjudica económicamente.

Shiva llamó «biopiratería» a la práctica de patentar variedades de semillas, y formó Navdanya para defender la soberanía alimentaria. Navdanya hace campaña por la agrobiodiversidad a través de una red de reservas de semillas y productores orgánicos, y ha ayudado a fundar más de cien bancos de semillas comunitarios: bancos genéticos donde se guardan semillas de cultivos y especies raras para su uso futuro. ■



Los abonos químicos han aumentado la producción de grano en India (cuya población de 1300 millones hace que la seguridad alimentaria sea prioritaria), pero acaban con la fertilidad del suelo.



Vandana Shiva

La activista medioambiental Vandana Shiva nació en el norte de India. De madre agricultora y padre guardabosques, Shiva estudió en India y Canadá, donde obtuvo el doctorado en filosofía de la física. Tras su regreso a India, en 1982 fundó la Research Foundation for Science, Technology and Ecology. Después del desastre de la planta de pesticidas de Bhopal en 1984, creció su interés por la agricultura, y tres años más tarde fundó Navdanya, con el objeto de proteger la biodiversidad y conservar las semillas nativas. Shiva está en contra del Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual de la Organización Mundial del Comercio (OMC), que amplía las patentes para incluir plantas y animales. La revista *Time* la nombró «heroína ambiental» en 2003.

Obras principales

1989 *The violence of the green revolution.*
2000 *Cosecha robada: el secuestro del suministro mundial de alimentos.*
2013 *Making peace with the Earth.*



LOS ECOSISTEMAS Y SUS ESPECIES SUSTENTAN Y HACEN PLENA LA VIDA HUMANA

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gretchen Daily (n. 1964)

ANTES
***C.* 400 a.C.** El filósofo griego Platón es consciente del impacto humano sobre la naturaleza, y observa que la deforestación causa la erosión del suelo y seca las fuentes.

1973 E. F. Schumacher, estadístico y economista alemán, acuña la expresión «capital natural» en *Lo pequeño es hermoso.*

DESPUÉS
1998 Un estudio del PNUMA, la NASA y el Banco Mundial explica cómo la protección de la Tierra beneficia a la humanidad.

2008 Un estudio de la Universidad de California en Berkeley muestra que la destrucción ecológica por los países más ricos supone una deuda mayor con los más pobres que la deuda del mundo en desarrollo.



Como montaña sagrada, el monte Fuji aporta un servicio cultural al pueblo japonés, mientras que la rica tierra volcánica que lo rodea aporta un servicio a las plantaciones de té locales.

Los ecólogos llaman servicios ecosistémicos a los beneficios que recibe la humanidad de los ecosistemas. Se pueden clasificar así algunos de los procesos naturales más importantes para la vida humana, como la polinización de los cultivos, la descomposición de desechos y la disponibilidad de agua potable. Según los ecólogos, al no ser fácilmente cuantificable todo lo que aportan los servicios ecosistémicos, estos quedan drásticamente infravalorados, mientras se explotan los recursos del mundo natural para obtener beneficios.

La idea de que los seres humanos se benefician de la naturaleza es muy antigua, pero el equilibrio entre la naturaleza y las necesidades humanas no llegó al primer plano del debate ecológico hasta la década de 1970. A mediados de la siguiente década circuló la noción de «servicios ecosistémicos», desarrollada en 1997 en dos artículos clave: «Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems», editado por Gretchen Daily, y «The value of the world's ecosystem servi-

Véase también: Actividad humana y biodiversidad 92–95 ▪ Resiliencia ecológica 150–151 ▪ La hipótesis Gaia 214–217 ▪ Devastación humana de la Tierra 299



Si continúa la tendencia actual, la humanidad alterará drásticamente los ecosistemas naturales restantes de la Tierra en unas décadas.
Gretchen Daily



ces and natural capital», editado por el economista ecológico estadounidense Robert Costanza. En 2001, el secretario general de Naciones Unidas Kofi Annan lanzó la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, que ayudó a popularizar el concepto en 2005, al publicarse una amplia evaluación del impacto humano sobre el medio.

Los cuatro tipos de servicio

El informe de 2005 de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio presentaba cuatro categorías de servicios ecosistémicos: de soporte, de provisión, de regulación y culturales. Gracias a los servicios de soporte, como la formación de suelo y la depuración del agua, existen todos los demás. Los servicios de provisión o abastecimiento consisten en: agua potable; alimento, en forma de cultivos y ganado; fibras, como la madera, el algodón u otros materiales usados en productos básicos para construir y hacer tejidos; y medicamentos naturales y plantas usadas en productos farmacéuticos. Entre los servicios de regulación están la capacidad de la naturaleza para controlar plagas –contrapuesta al uso humano de pesticidas– y la de la atmósfera para limpiarse de forma natural, así como la protección ante fenómenos climáticos de barreras naturales como los humedales y manglares. La polinización es otro servicio de regulación importante, y está amenazado por el declive global de polinizadores como las abejas. Los servicios culturales se basan en que las sociedades asignan significados culturales o espirituales a elementos del ecosistema tales como árboles, animales, ríos y montañas sagrados. El valor estético o recreativo de un paisaje natural es otro tipo de servicio cultural.

En esencia, el concepto de servicios del ecosistema sirve para comprender nuestro vínculo inextricable con la naturaleza y cómo la existencia humana sería imposible sin el mundo natural. Los ecólogos utilizan el concepto para ilustrar lo imprescindibles que son estos sistemas para las condiciones básicas de la vida, así como para convencer a las industrias, las empresas y los gobiernos de la necesidad de la conservación ecológica. ▪



Los planes para proteger el aire, el agua, la naturaleza y la fauna son planes para proteger al ser humano.
Stewart Udall
Político y conservacionista estadounidense





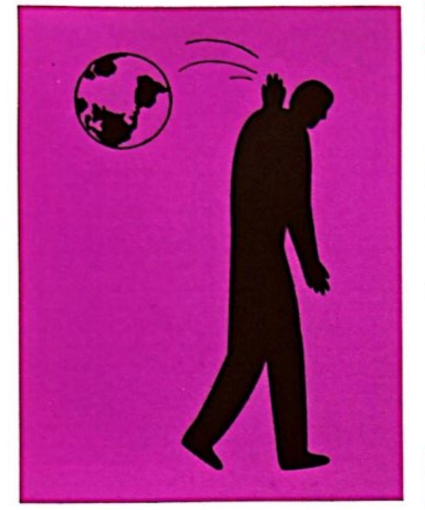
Gretchen Daily

A Gretchen Daily, nacida en 1964 en Washington, D.C., le apasionó la ecología desde una edad muy temprana. Su familia se trasladó a Alemania Occidental en 1977, y allí fue testigo de la crisis nacional de la lluvia ácida y de las protestas callejeras por la degradación ambiental. Daily terminó dos carreras, y se doctoró en biología en la Universidad de Stanford, donde es catedrática Bing de Ciencias Ambientales.

Gretchen Daily estudia la biodiversidad en el marco de la llamada «biogeografía del campo», o las porciones de la naturaleza no usadas para el desarrollo humano, pero cuyos ecosistemas sufren el impacto de la actividad humana. Es cofundadora del Natural Capital Project, que busca incorporar el ecologismo en las empresas y en las políticas públicas.

Obras principales

1997 *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems.*
2002 *The new economy of nature: the quest to make conservation profitable.*



VIVIMOS EN ESTE PLANETA COMO SI TUVIERAMOS OTRO PLANETA A DONDE IR

GESTIÓN DE RESIDUOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Paul Connett (n. 1940)

ANTES
1970 Se celebra el primer Día de la Tierra en EE UU para concienciar de la contaminación y del reciclaje.

1988 En EE UU se introduce el sistema RIC de identificación de resinas para animar a reciclar el plástico.

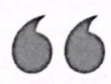
1992 En la Cumbre de la Tierra de Río, 105 jefes de Estado se comprometen con el desarrollo sostenible.

DESPUÉS
2010 Las Naciones Unidas lanzan la Alianza Global de Gestión de Residuos para promover la conservación de recursos y la eficiencia.

2012 Los objetivos de la Conferencia de Desarrollo Sostenible de la ONU incluyen la reducción de residuos y métodos de producción respetuosos con el medio.

Más de 65000 personas de al menos 180 países viajaron a Johannesburgo (Sudáfrica) en 2002 para asistir a la Cumbre de la Tierra sobre Desarrollo Sostenible de la ONU. Las resoluciones finales incluyeron un llamamiento a minimizar el derroche, maximizar la reutilización y el reciclaje y desarrollar sistemas «limpios» de gestión de residuos.

A finales del siglo xx quedó claro que los desechos estaban alcanzando proporciones abrumadoras. La industrialización, el crecimiento de grandes poblaciones urbanas y el uso creciente del plástico estaban contribuyendo al basurero del mundo. Tradicionalmente, la basura se quemaba o enterraba; sin embargo, ambas opciones están asociadas a la emisión de gases de efecto invernadero y, en el caso de los vertederos, al riesgo de contaminar aguas subterráneas. La solución a este problema tiene que estar en otra parte.



La contaminación no es más que los recursos que no aprovechamos. Dejamos que se dispersen porque hemos sido ignorantes de su valor.

R. Buckminster Fuller

Inventor y arquitecto estadounidense




La evolución del reciclaje

El reciclaje de desechos no es una idea nueva, pero su uso como modo de reducir las montañas de basura que de otro modo acaban en los vertederos se remonta a las décadas de 1960 y 1970, cuando organizaciones como Greenpeace concienciaron más al público sobre cuestiones medioambientales. Recientemente, activistas como Paul Connett, autor de *La solución basura cero* (2013), han redoblado el llamamiento global a reducir el consumo y reutilizar o reciclar artículos en lugar de tirarlos.

Desde la década de 1970, muchos estados de EE UU y la mayoría de los países de Europa, así como Canadá, Australia y Nueva Zelanda, han introducido los contenedores para distintos desechos reciclables. En 1975, los suecos reciclaban el 38 % de la basura, mientras que hoy son líderes mun-

Véase también: Calentamiento global 202–203 ▪ Contaminación 230–235 ▪ Un páramo de plástico 284–285 ▪ Energías renovables 300–305

Los actos individuales influyen: las viviendas del mundo desarrollado añaden una tonelada anual a los vertederos.

Rechazar las bolsas de plástico y el envasado excesivo. Comprar productos en **formato grande** o sin envasar.

Repensar al comprar. **¿Realmente necesitas** lo que estás comprando?

Reutiliza lo que puedas, o **dáselo** a alguien que lo pueda usar.

Recicla lo que no puedas usar para que se convierta en **productos nuevos**.

diales en ello, pues reciclan el 99 % de los desechos domésticos; en torno a un 50 % se quema en las plantas de reciclaje, generando calor para las viviendas. Suecia importa también basura de otros países para procesarla en sus 32 plantas incineradoras. En 2015 importó unos 2,3 millones de toneladas de Noruega, Reino Unido, Irlanda y otros países.

Minería urbana

Los aparatos electrónicos son el tipo de desechos que más rápido crece. La chatarra electrónica de teléfonos móviles, discos duros de ordenador, televisiones y otros aparatos eléctricos llegó casi a los 42 millones de toneladas en 2014, casi el 25 % más que en 2010. Esta chatarra contiene a menudo metales preciosos como el oro, la plata y el paladio usados en los circuitos, además del cobre. Así, la «minería» en vertederos en busca de estos metales puede ser más rentable que en los depósitos minerales naturales. La chatarra electrónica incluye también metales tóxicos, como cadmio, plomo y mercurio. En países que tanto generan como importan chatarra electrónica, la minería en los vertederos es contaminante. Europa cuenta hoy con una industria de reprocesado de chatarra electrónica, pero existen relativamente pocos planes al respecto en el resto del mundo.

Hay muchas iniciativas nuevas, pero el mundo sigue muy lejos del ideal de residuos cero de Connett. Los individuos y los gobiernos tienen ante sí el gran desafío de reducir el consumo y reciclar residuos globales que pronto alcanzarán los 2000 millones de toneladas anuales. ■

Metano de vertederos

El metano es el gas de efecto invernadero más perjudicial después del dióxido de carbono (CO_2): sus concentraciones atmosféricas son más bajas que las de CO_2, pero es 25 veces más eficaz para atrapar calor en la atmósfera. El metano atmosférico procede de varias fuentes naturales, como la descomposición vegetal en las ciénagas y humedales, pero también de la cría de ganado, el uso de combustibles fósiles y la descomposición de basura en los vertederos.

En varios países ya se está tratando el metano procedente de vertederos para producir energía. El gas de los vertederos contiene hasta un 60 % de metano, dependiendo de la composición de los residuos y la edad del vertedero. Se instalan tuberías para extraer el metano, que luego se trata y se purifica. La mayor parte se usa para generar electricidad, pero sirve también para la industria. Con un tratamiento suplementario, también puede convertirse en combustible para vehículos.



Extracción de metano en el vertedero de Payatas (Manila), el primero de Filipinas en convertir el gas en energía como parte de un programa de la ONU.

BIOGRAFIAS



Además de los científicos reseñados en los capítulos precedentes, muchos otros hombres y mujeres hicieron aportaciones relevantes al desarrollo de la ecología, a la altura de los mayores pensadores y científicos de su tiempo. Algunos destacaron en el mundo académico, otros eran de ámbitos distintos pero fueron pioneros con enfoques nuevos, mientras que otros fueron activistas formidables. Han trabajado en disciplinas muy diversas, pero todos han contribuido a nuestro conocimiento de la biosfera terrestre, su evolución y el lugar de la humanidad en ella. De manera vital, su trabajo sigue mostrando lo que se debe hacer para conservar el mundo natural y proteger la Tierra de las consecuencias destructivas de la actividad y la intervención humanas.

SAMUEL DE CHAMPLAIN
1574–1635

El explorador, cartógrafo, militar y naturalista francés Samuel de Champlain exploró y cartografió gran parte de Canadá, fundó la ciudad de Quebec y estableció la colonia de Nueva Francia. Agudo observador y cronista, documentó los animales que vio y tomó notas sobre plantas, con detalles de las hojas, las frutas y los frutos secos, y se informó acerca de su uso entre los nativos americanos.
Véase también: Clasificación de los seres vivos 82–83

JAMES AUDUBON
1785–1851

Pionero de la ornitología de América del Norte, Audubon se crió en Haití y Francia, y emigró a EE UU en 1803. Apasionado de la naturaleza, sobre todo de las aves, era un pintor de talento, y con una técnica inusual: tras disparar a las aves, las mantenía en una pose natural mediante alambres, y las pintaba sobre el fondo de su hábitat natural. Entre 1827 y 1838 publicó en una serie de entregas *The birds of America*, que incluía 435 impresiones en color de 497 especies, seis de ellas hoy extinguidas. Audubon también descubrió 25 especies no descritas antes, y usó hilo para anillar aves, atándolo a las patas para identificar cada ave y saber más sobre sus desplazamientos.
Véase también: Ecología animal 106–113

MARY ANNING
1799–1847

En 2010, la Royal Society nombró a Mary Anning entre las diez mujeres británicas más influyentes en la historia de la ciencia. Anning se hizo famosa como coleccionista de fósiles y paleontóloga, y entre sus extraordinarios hallazgos en estratos jurásicos de los acantilados de la costa de Dorset se cuentan el primer ictiosaurio correctamente descrito, dos plesiosaurios relativamente completos y el primer pterosaurio encontrado fuera de Alemania. Sus hallazgos contribuyeron a cambiar las ideas sobre la historia de la Tierra, ya que aportó pruebas sólidas de la existencia de especies extinguidas.
Véase también: Extinciones masivas 218–223

CATHERINE PARR TRAILL
1802–1899

La botánica y prolífica autora Catherine Parr Traill nació en Reino Unido, y tras su matrimonio en 1832 emigró a lo que hoy es Ontario, en Canadá. Allí escribió sobre la vida de los colonos de Canadá, y también sobre el entorno natural en *Canadian wild flowers* (1865) y *Studies of plant life in Canada* (1885). Sus numerosos álbumes y colecciones de plantas se guardan en el Herbario Nacional de Canadá, en el Museo Canadiense de la Naturaleza, en Ottawa.
Véase también: Hábitats en peligro 236–239

KARL AUGUST MÖBIUS
1825–1908

Al pionero y erudito alemán Karl August Möbius le interesó sobre todo la ecología de los ecosistemas marinos. Tras estudiar en el Museo de Historia Natural de Berlín y obtener el doctorado en la Universidad de Halle, abrió un acuario marino en Hamburgo en 1863. Como profesor de zoología en la Universidad de Kiel, su trabajo sobre la viabilidad comercial de la producción de ostras en la bahía de Kiel le llevó a reconocer las relaciones de dependencia entre los organismos del banco de ostras.
Véase también: El ecosistema 134–137

ERNST HAECKEL
1834–1919

Ernst Haeckel fue un biólogo, físico y pintor que popularizó las ideas de Charles Darwin en Alemania (a la vez que rechazaba muchas de ellas), y también fue el introductor del término «ecología», en 1866.

Nacido en Potsdam, estudió en varias universidades antes de convertirse en profesor de zoología de la Universidad de Jena en 1861. Fue el primer biólogo en proponer el reino de los protistas para organismos que no son animales ni vegetales, y estudió y registró los protozoos de las profundidades marinas llamados radiolarios.
Véase también: Evolución por selección natural 24–31

WILLIAM BLAKE RICHMOND
1842–1921

Más conocido como pintor, escultor y diseñador de vidrieras y mosaicos, el británico William Blake Richmond se convirtió en activista ambiental tras experimentar la escasa luz y el aire ahumado de los fuegos de carbón durante los inviernos de Londres. En 1898 fundó la Coal Smoke Abatement Society (CSAS) para presionar a los políticos en favor del aire limpio. La Ley de Salud Pública (contra el humo) se aprobó en 1926, y la Ley de Aire Limpio, en 1956.
Véase también: Contaminación 230–235

THEODORE ROOSEVELT
1858–1919

Para compensar el asma que padeció de niño, Roosevelt se apasionó por el deporte y la naturaleza. Cuando concurrió como candidato a la vicepresidencia de EE UU en 1900, con el candidato William McKinley, fue con un programa de paz, prosperidad y conservación. Roosevelt se convirtió en el 26.º presidente tras el asesinato del presidente McKinley en 1901, y como tal creó el Servicio Forestal de EE UU, cinco parques nacionales, 51 reservas de aves y 150 bosques nacionales protegidos.
Véase también: Deforestación 254–259

JÓSEF PACZOSKI
1864–1942

Jósef Paczoski fue un ecólogo polaco nacido en la actual Ucrania. Estudió botánica en la Universidad de Kiev, y fue pionero de la «fitosociología» (el estudio de las comunidades naturales de plantas), término que usó por primera vez en 1896. En la década de 1920 estableció el primer instituto de fitosociología del mundo en la Universidad de Poznan, donde era profesor de botánica sistemática. Botánico consumado, publicó obras sobre la flora de Europa Central, en particular del bosque de Białowieża, que gestionó como un parque natural.
Véase también: Los organismos y su medio 166

JACK MINER
1865–1944

Conocido también como «Wild Goose Jack», Miner se mudó de EE UU a Canadá en 1878. Fue analfabeto hasta los 33 años, lo cual no le impidió emprender proyectos locales de conservación, como la construcción de comederos invernales para los colines de Virginia. Fue uno de los primeros en América del Norte en usar anillas de aluminio en las patas de las aves, para seguir sus desplazamientos. La primera recuperación de un anillo de ave que tuvo lugar en América del Norte fue la de un pato anillado por él y visto luego en Carolina del Norte. Se cree que anilló más de 90 000 aves salvajes, con el fin de establecer una gran base de datos de rutas migratorias.
Véase también: Ciencia ciudadana 178–183

MARJORY STONEMAN DOUGLAS
1890–1998

Formidable activista por la protección de los Everglades de Florida, Marjory S. Douglas fue también periodista y autora de éxito, sufragista y activista por los derechos civiles. Su libro *The Everglades: river of grass*, de 1947, generó interés por los humedales de Florida, y en 1969 fundó Friends of the Everglades, para defender la zona del drenaje y el desarrollo. Douglas siguió activa cumplido ya el siglo, y a los 103 años de edad recibió la Medalla Presidencial de la Libertad.
Véase también: Ciencia ciudadana 178–183

BARBARA MCCLINTOCK
1902–1992

In 1983, Barbara McClintock fue la primera mujer en ganar en solitario el Nobel de Fisiología o Medicina, y la primera mujer estadounidense en ganar un Nobel no compartido. El galardón reconocía su hallazgo –más de 30 años antes– de los elementos genéticos trasponibles, o «genes saltarines», que a veces crean o revierten mutaciones. Como citogenetista que estudió la relación entre los cromosomas y el comportamiento celular, describió también el primer mapa genético del maíz, ligando rasgos físicos a regiones del cromosoma, y el mecanismo por el cual los cromosomas intercambian información.
Véase también: La función del ADN 34–37

JACQUES COUSTEAU
1910–1997

El explorador subacuático francés Jacques Cousteau fue muy famoso como presentador de documentales sobre el mundo acuático. Tras inventar el aparato respiratorio subacuático Aqua-Lung en 1943, trabajó con la Armada francesa despejando minas acuáticas tras la Segunda Guerra Mundial. Luego convirtió el dragaminas *Calypso* en una nave de investigación con la que exploró los océanos, y también escribió varios libros y filmó horas de metraje para la televisión. El *Calypso* resultó gravemente dañado en 1996, y Cousteau murió repentinamente en 1997, antes de poderse permitir sustituirlo.
Véase también: Un páramo de plástico 284–285

PIERRE DANSEREAU
1911–2011

Dansereau, nacido en Montreal, fue un ecólogo de las plantas canadiense francófono, pionero del estudio de la dinámica de los bosques, y considerado uno de los padres de la ecología. Obtuvo el doctorado en taxonomía de plantas en la Universidad de Ginebra en 1939. Más tarde ayudó a crear el Jardín Botánico de Montreal, y escribió muchos trabajos sobre botánica, biogeografía y la interacción de los seres humanos y el medio ambiente. En 1988 fue nombrado profesor emérito de la Universidad de Montreal, puesto que mantuvo hasta su jubilación en 2004, a los 93 años.
Véase también: Biogeografía 200–201

MARY LEAKEY
1913–1996

La londinense Mary Leakey, una de las figuras más destacadas de la paleoantropología, participó en su primera excavación arqueológica a los 17 años, en Devon, contratada como ilustradora. En 1937 se casó con el paleoantropólogo Louis Leakey, y la pareja se mudó a África para trabajar en la garganta de Olduvai, lugar rico en yacimientos fósiles, en la actual Tanzania. En 1948, Mary encontró el cráneo fósil de un antepasado de simios y humanos de hace 18 millones de años, *Proconsul africanus*. A este le siguieron otros avances en el conocimiento del linaje humano, como el hallazgo, en 1960, de *Homo habilis*, homínido de hace entre 1,4 y 2,3 millones de años y que usaba herramientas de piedra.
Véase también: Evolución por selección natural 24–31

MAX DAY
1915–2017

El ecólogo y entomólogo Max Day desarrolló ya de niño en Australia el interés por la vida salvaje, y particularmente por los insectos. Se licenció en botánica y zoología en la Universidad de Sídney en 1937, y se doctoró en Harvard con un trabajo sobre termitas. Tras la Segunda Guerra Mundial, volvió a Australia, donde fue el primer presidente de la división de Estudios Silvícolas de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth, entre 1976 y 1980. Conocido sobre todo por su estudio de la mixomatosis y su uso para controlar poblaciones de conejos, Day publicó su primer trabajo en 1938, y el último, sobre polillas, 74 años después.
Véase también: Termorregulación en los insectos 126–127 ▪ Especies invasoras 270–273

JUDITH WRIGHT
1915–2000

Poetisa ante todo, Judith Wright alcanzó también renombre en su Australia natal por sus campañas en favor de los derechos de los aborígenes a su tierra y por cuestiones ambientales. Nació en Armidale, Nueva Gales del Sur, y estudió en la Universidad de Sídney. Wright publicó su primer libro de poesía en 1946. Entre 1967 y 1971, junto con el pintor John Busst y el ambientalista Len Webb, construyó una alianza de grupos conservacionistas, sindicatos y ciudadanos para combatir los planes del gobierno del estado de Queensland para abrir a la minería la Gran Barrera de Coral. La campaña, contada en *The coral battleground* (1977), logró su objetivo.
Véase también: El movimiento verde 308–309

RAMON MARGALEF
1919–2004

Ecólogo, limnólogo y oceanógrafo español, Ramon Margalef fue el primer catedrático de Ecología de España. Entre su trabajo académico cabe destacar la aplicación de la teoría de la información a los estudios ecológicos y la creación de modelos matemáticos para el estudio de las poblaciones. Trabajó en el Instituto de Biología Aplicada y en el Instituto de Investigaciones Pesqueras, que dirigió entre 1966 y 1967. Ese año constituyó el Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona, donde formó a un buen número de ecólogos y oceanógrafos.
Véase también: Análisis de viabilidad de poblaciones 312–315

EILEEN WANI WINGFIELD
1920–2014

Como mujer aborigen joven en Australia, Eileen Wani Wingfield cuidó de vacas y ovejas con su padre y su hermana. A inicios de la década de 1980 se tendió frente a las excavadoras en el pantano de Canegrass, para protestar contra la construcción de la mina de uranio de Olympic Dam. Wingfield se asoció con Kampakuta Brown y otras figuras de la comunidad aborigen para colaborar en la campaña contra los planes del gobierno de crear un vertedero nuclear en Australia Meridional. Ambas recorrieron el país y hablaron en mítines para denunciar los peligros del vertedero, que aumentarían cuando los gobiernos y empresas extranjeras vieran la ocasión de deshacerse de sus residuos radiactivos.
Véase también: Contaminación 230–235

EUGENIE CLARK
1922–2015

Conocida como la «Dama de los Tiburones» por sus estudios del comportamiento de estos, la ecóloga marina estadounidense Eugenie Clark fue pionera del buceo para estudios científicos. Entre 1955 y 1966 dirigió el recién creado Laboratorio Marino Cape Haze, en Florida, en cuyas aguas cercanas hizo inmersiones, y donde trabajó con otras ecólogas, como Sylvia Earle. Gran defensora de la conservación marina, Clark hizo varios descubrimientos clave sobre tiburones y peces. Entre 2000 y 2015, trabajó en el antiguo Cape Haze, renombrado como Laboratorio Marino Mote ya en 1967 y que trabaja para proteger a las especies de tiburones, conservar los arrecifes y fundar pesquerías sostenibles.
Véase también: Comportamiento animal 116–117

DAVID ATTENBOROUGH
n. 1926

El naturalista y productor televisivo británico David Attenborough fue directivo de la BBC antes de dejarlo para dedicar más tiempo a escribir y producir documentales. Escribió y narró varias series sobre la naturaleza, entre las que destaca la serie «Life», que comenzó con *Life on Earth* (1979). El trabajo de Attenborough ha sido reconocido por haber renovado el interés público por la naturaleza y la conservación en Gran Bretaña.
Véase también: Un páramo de plástico 284–285

PETER H. KLOPFER
n. 1930

Peter Klopfer, nacido en Berlín, es un ecólogo cuya principal área de interés es la etología, el estudio del comportamiento animal en su medio natural. Su libro *An introduction to animal behaviour: ethology's first century*, de 1967, fue un sondeo y una síntesis de las teorías etológicas pasadas y presentes. En 1968, comenzó a enseñar en el departamento de zoología de la Universidad de Duke, en Carolina del

Norte, donde su actividad fue clave para poner en marcha su centro de primates.
Véase también: Comportamiento animal 116–117

DIAN FOSSEY
1932–1985

La mayor parte de lo que se sabe sobre la vida y las estructuras sociales de los gorilas de montaña de África se debe al trabajo de la primatóloga conservacionista Dian Fossey. Hija de una modelo de San Francisco, se licenció y trabajó como terapeuta ocupacional antes de visitar África, donde conoció y se sintió inspirada por Mary y Louis Leakey. A inicios de 1967, Fossey fundó el Centro de Investigación Karisoke en las montañas de Ruanda, como base para estudiar a los gorilas. Su éxito de ventas *Gorilas en la niebla*, de 1983, expone sus experiencias, y fue luego adaptado al cine. Fue asesinada en su campamento en diciembre de 1985, probablemente por su oposición a la caza furtiva.
Véase también: Comportamiento animal 116–117

TOMOKO OHTA
n. 1933

Tomoko Ohta es un genetista de poblaciones que en 1973 propuso una teoría casi neutralista, que recoge la idea de que las mutaciones que no son neutrales ni dañinas tienen un papel señalado en la evolución. Tras licenciarse en la Universidad de Tokio en 1956, Ohta trabajó sobre citogenética (la relación entre los cromosomas y el comportamiento celular) del trigo y la remolacha, y trabajó en el Instituto Nacional de Genética de Japón entre 1969 y 1996.
Véase también: El gen egoísta 38–39

STANLEY C. WECKER
1933–2010

El experto estadounidense en comportamiento animal Stanley Wecker fue un estudioso de las poblaciones animales y la ecología de comunidades, y en particular de la cuestión de qué determina el lugar que eligen los animales para vivir. Su trabajo de 1963 sobre la selección de hábitat del ratón ciervo demostraba que intervienen tanto el instinto como la experiencia.
Véase también: Nichos ecológicos 50–51

SYLVIA EARLE
n. 1935

Bióloga marina y conservacionista, Earle es una experta en el impacto de los vertidos de petróleo. En 1991 evaluó los daños causados por la destrucción de los pozos de Kuwait por las tropas iraquíes durante la guerra del Golfo. Earle realizó un trabajo similar tras los vertidos de los petroleros *Exxon Valdez* y *Mega Borg* y de la plataforma de prospección Deepwater Horizon. En 2009, Earle lanzó Mission Blue, que, en 2018, había establecido ya casi 100 áreas marinas protegidas en todo el mundo.
Véase también: Contaminación 230–235

ROBERT E. SHAW
n. 1936

Shaw es un pionero estadounidense de la psicología ecológica, que estudia cómo el medio ambiente determina la percepción, la acción, la comunicación, el aprendizaje y la evolución humana y animal. En 1977 coeditó *Perceiving, acting, and knowing: toward an ecological psychology*, que inauguró este campo de estudio. En 1981, Shaw fue el presidente fundador de la International Society for Ecological Psychology, y actualmente es profesor emérito en el departamento de ciencias psicológicas de la Universidad de Connecticut.
Véase también: Modelos animales para el comportamiento humano 118–125

DAVID SUZUKI
n. 1936

El científico canadiense David Suzuki se licenció en zoología en la Universidad de Chicago en 1961, y dos años más tarde era profesor del departamento de genética de la Universidad de Columbia Británica. Desde mediados de la década de 1970 ha sido presentador de televisión y radio, y autor de libros sobre la naturaleza y el medio ambiente. Suzuki cofundó la Fundación David Suzuki en 1990, con el fin de estudiar maneras sostenibles de vivir en armonía con el mundo natural.
Véase también: Ética ambiental 306–307

DANIEL B. BOTKIN
n. 1937

Daniel Botkin, autor y ecologista estadounidense, se doctoró en ecología de plantas en 1968 en la Universidad de Rutgers. Escribe y da conferencias sobre todos los aspectos del medio ambiente, desde los ecosistemas de bosque hasta poblaciones de peces, y asesora también a organizaciones, empresas y gobiernos. Tras décadas de estudio del cambio climático, ha cuestionado en qué medida lo causa la actividad humana. Trabaja como científico de investigación en el Laboratorio de Biología Marina, en Massachusetts, y participa en programas de estudio ambientales de varias universidades de EE UU.
Véase también: Detener el cambio climático 316–321

EILEEN KAMPAKUTA BROWN
n. 1938

A principios de la década de 1990, el gobierno australiano hizo públicos los planes para construir un vertedero de residuos nucleares cerca de Woomera, en el desierto de Australia Meridional. Junto con Eileen Wani Wingfield, Brown, anciana aborigen, estableció un *kungka tjuta* (consejo de mujeres) en Coober Pedy para impedirlo. Conocían los defectos de nacimiento, el cáncer y otras enfermedades que habían proliferado tras las pruebas nucleares del Ejército británico en el desierto en las décadas de 1950 y 1960, y temían que la radiación afectara a las aguas subterráneas. Los planes se abandonaron, y Brown y Wingfield recibieron el Premio Medioambiental Goldman en 2003.
Véase también: Contaminación 230–235

LYNN MARGULIS
1938–2011

La bióloga estadounidense Lynn Margulis asistió a la universidad en Chicago cuando tenía solo 15 años, y se doctoró en la Universidad de California en Berkeley en 1965.

Al año siguiente, en la Universidad de Boston, propuso que las células dentro de los núcleos habían evolucionado como resultado de la asociación simbiótica de bacterias. La idea no fue generalmente aceptada hasta la década de 1980, pero transformó la comprensión de la evolución celular.
Véase también: La hipótesis Gaia 214–217

PAUL F. HOFFMAN

n. 1941

El hallazgo por el científico canadiense Paul Hoffman de carbonatos que probaban una antigua glaciación en rocas sedimentarias del Precámbrico en Namibia revivió la hipótesis «Tierra bola de nieve», o de la glaciación global, en los estudios del cambio climático en 2000. La expresión la usó por primera vez el geólogo estadounidense Joseph Kirschvink en 1992, aunque se remontan a finales del siglo XIX las especulaciones acerca de que la superficie terrestre estuviera completamente helada hace más de 650 millones de años.
Véase también: Antiguas glaciaciones 198–199

SIMON A. LEVIN

n. 1941

Levin, ecólogo estadounidense, está especializado en el uso de modelos matemáticos sofisticados, junto con observaciones de campo y laboratorio, para comprender el funcionamiento de los ecosistemas. También estudia las relaciones entre ecología y economía. Se doctoró en matemáticas por la Universidad de Maryland en 1964, y fue profesor en la Universidad de Cornell de 1965 a 1992. Tras trasladarse a Princeton, fue nombrado director del Center for BioComplexity de su universidad, que estudia los mecanismos que generan y mantienen la complejidad en el mundo vivo.
Véase también: Ecuaciones predador-presa 44–49

JAMES A. YORKE

n. 1941

El matemático y físico estadounidense de la Universidad de Maryland James Yorke es conocido sobre todo por su trabajo sobre la teoría del caos. En su trabajo de 1975 «Period three implies chaos», escrito con el matemático chino Tien-Yien Li, Yorke mantenía que, por encima de una determinada tasa de crecimiento, las cifras de población se vuelven totalmente impredecibles, hallazgo este con importantes implicaciones para la ecología.
Véase también: Análisis de viabilidad de poblaciones 312–315

IAN LOWE

n. 1942

El ecologista australiano Ian Lowe estudió ingeniería y ciencia en la Universidad de Nueva Gales del Sur, y se doctoró en física por la Universidad de York. Es asesor del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y un defensor acérrimo de las energías renovables, que, según mantiene, son «más rápidas, menos caras y menos peligrosas que la energía nuclear». En 1996, Lowe presidió el grupo de expertos responsable del primer informe sobre el estado del medio ambiente en Australia. Lowe es profesor emérito de ciencia, tecnología y sociedad en la Universidad de Griffith, en Brisbane.
Véase también: Energías renovables 300–305 ▪ Detener el cambio climático 316–321

AILA KETO

n. 1943

La australiana Aila Keto pasó gran parte de su juventud explorando la Gran Barrera de Coral y las pluvisilvas próximas. Estudió bioquímica en la universidad, y pasó a trabajar para la Universidad de Queensland. En 1982, junto con su marido, Keith, fundó la Rainforest Conservation Society, que hizo una gran labor para salvar los Trópicos húmedos de Australia.
Véase también: Biomas 206–209

BOB BROWN

n. 1944

Tras estudiar Medicina en la Universidad de Sídney, Bob Brown ejerció como médico en Australia y Reino Unido. Se mudó a Tasmania en 1972, y se implicó pronto en el movimiento ecologista. A principios de la década de 1980, fue uno de los líderes de la campaña que logró impedir la construcción de la presa Franklin, que habría destruido hábitats clave. En 1996, Brown fue elegido para el Senado de Australia por el Partido Verde. Al jubilarse en 2012, estableció la Fundación Bob Brown para la protección de los hábitats de Australia.
Véase también: La crisis del agua 286–291

BIRUTE GALDIKAS

n. 1946

La antropóloga y primatóloga de origen alemán Birute Galdikas fue pionera del estudio de los orangutanes en su medio natural. Junto con Jane Goodall y Dian Fossey, fue una de las *«Trimates»*, o «Ángeles de Leakey», escogidas por Louis Leakey para estudiar a los grandes simios. Leakey la convenció para apoyar el establecimiento de un puesto de investigación en Borneo, al que se mudó en 1971. Durante más de 30 años, Galdikas estudió a estos grandes simios, defendió la protección para ellos y su hábitat de la pluvisilva y se encargó de la rehabilitación de los orangutanes huérfanos.
Véase también: Comportamiento animal 116–117

BRIAN A. MAURER

1954–2018

El trabajo de 1989 de Maurer con James H. Brown «Macroecology: the division of food and space among species on continents» fue la primera articulación clara de la idea del valor de estudiar patrones y procesos ecológicos en áreas extensas y marcos temporales prolongados. En sus últimos años, Maurer estudió la dinámica de la difusión de aves exóticas y la diversidad de especies entre los mamíferos de montaña de América del Norte.
Véase también: Macroecología 185

NANCY GRIMM

n. 1955

Nancy Grimm, de la Universidad Estatal de Arizona, es una ecóloga del cambio cli-

mático y la sostenibilidad cuyos estudios se centran en la interacción del cambio climático, la actividad humana y los ecosistemas. Su trabajo se ha ocupado de la circulación del agua y las sustancias químicas por los ecosistemas. Grimm fue presidenta de la Ecological Society of America, y científica destacada del US Global Climate Change Research Program.
Véase también: Servicios ecosistémicos 328–329

TIM FLANNERY
n. 1956

Flannery, destacado ecologista de Australia, se doctoró en 1984 por la Universidad de Nueva Gales del Sur con un trabajo sobre la evolución de los canguros. Luego se labró una reputación como mastozoólogo, hallando varias especies de mamíferos, y como experto en cambio climático. Fue comisionado jefe de la Climate Commission, organismo gubernamental australiano, y es un defensor de las energías renovables.
Véase también: Energías renovables 300–305

SUSAN KAMINSKYJ
n. 1956

Desde su laboratorio en la Universidad de Saskatchewan (Canadá), Susan Kaminskyj –bióloga celular y micóloga– fue pionera en el uso de hongos para limpiar vertidos de petróleo, proceso llamado biorremediación. Kaminskyj y su equipo hallaron que, cuando se trataban semillas con el hongo TSTh20-1, las plantas podían crecer en el sustrato de las tierras afectadas a la vez que limpiaban el suelo.
Véase también: La ubicuidad de las micorrizas 104–105 ▪ Contaminación 230–235

ROSEMARY GILLESPIE
n. 1957

Rosemary Gillespie, de origen escocés, estudió zoología en la Universidad de Edimburgo antes de mudarse a EE UU y doctorarse en la Universidad de Tennessee. Gillespie es conocida sobre todo por sus estudios sobre qué impulsa la biodiversidad al nivel de las especies, así como por sus estudios evolutivos en archipiélagos de punto caliente, como Hawái, en los que se conoce la edad de cada isla con cierta precisión. La mayor parte de su trabajo se ocupa de la evolución de especies de arañas. Gillespie está al frente del EvoLab de la Universidad de California en Berkeley, grupo de investigación sobre artrópodos.
Véase también: Termorregulación en los insectos 126–127 ▪ Biogeografía de islas 144–149

HARVEY LOCKE
n. 1959

Nacido en Calgary (Canadá), Harvey Locke ejerció como abogado antes de dedicarse a la conservación. Locke está comprometido con las áreas de la ecología conocidas como conservación de grandes paisajes y conectividad, que suponen conectar tierras, ya sean urbanas o salvajes, a lo largo de una red amplia. Fue un fundador de la Yellowstone to Yukon Conservation Initiative, organización que hace campaña para crear un corredor continuo para la vida salvaje entre esas dos áreas de América del Norte. En 2009 cofundó el movimiento Nature Needs Half, que defiende declarar protegida la mitad de la tierra y aguas del planeta en 2050, algo necesario según él para evitar una sexta extinción masiva.
Véase también: Extinciones masivas 218–223

MAJORA CARTER
n. 1966

Siguiendo a su perro por un solar degradado hasta las orillas del río Bronx en su Nueva York natal, Majora Carter comprendió el potencial que tenía la zona para la regeneración. Consiguió fondos municipales para crear allí el Hunts Point Riverside Park, como lugar de ocio y acceso al río para la población local. Posteriormente, su organización Sustainable South Bronx (SSBx) reunió apoyos para la renovación urbana «verde» en barrios deprimidos de otras partes de Nueva York. SSBx hace también campaña por mejorar la calidad del aire y la oferta alimentaria.
Véase también: El movimiento verde 308–309

SARAH HARDY
n. 1974

Hardy es bióloga marina estadounidense y exploradora polar, y su campo de estudio es el efecto sobre el medio ambiente de la minería en el fondo del mar. Defiende que para proteger las comunidades marinas y la biodiversidad es importante desarrollar un enfoque sistemático de la zonificación de los océanos, con zonas protegidas de mar profundo como prioridad. Hardy estudió biología marina en la Universidad de California, y se doctoró en oceanografía por la Universidad de Hawái en 2005.
Véase también: Un páramo de plástico 284–285

KATEY WALTER ANTHONY
n. 1976

Katey Walter Anthony, de la Universidad de Alaska, es ecóloga de sistemas acuáticos y está especializada en medios polares. Ha estudiado las emisiones de dióxido de carbono y metano de lagos en el Ártico norteamericano. En 2017 descubrió que escapaba una cantidad desacostumbradamente grande de metano de un lago ártico, y que el gas procedía de profundidades antes no descubiertas. De replicarse en otros lugares, tales emisiones de reservas en lo profundo del permafrost podrían causar un aumento drástico de la cantidad de metano en la atmósfera.
Véase también: La curva de Keeling 240–241

AUTUMN PELTIER
n. 2004

Peltier, de la Nación Originaria canadiense Wikwemikong y residente en Ontario (Canadá), ha realizado campañas en favor del agua limpia, defendiendo que la humanidad debe tratar el agua con mayor respeto. Con 13 años, fue una de las personas más jóvenes que ha hablado ante la Asamblea General de la ONU. En su discurso propuso como política «que ningún niño crezca sin saber qué es el agua potable limpia, o que no conozca nunca el agua corriente».
Véase también: La crisis del agua 286–291

GLOSARIO

abiótico No vivo. Se aplica a menudo a los componentes no vivos de un ecosistema, como el clima o la temperatura.

abundancia Número de individuos de una especie dada en un ecosistema; una especie abundante está fuertemente representada entre el resto de las poblaciones.

agua subterránea Agua bajo la superficie terrestre, en espacios en el suelo, la arena o la roca.

amenazada Especie cuya población es tan reducida que corre riesgo de extinguirse por completo.

antropogénico Con origen en la actividad humana, o influido por ella.

autótrofo Organismo productor que fabrica su propio alimento a partir de fuentes como la luz, el agua y las sustancias químicas del aire.

biodegradable Que se descompone por procesos naturales; aplicado por lo general a los productos de desecho.

biodiversidad Variedad de vida ecológica en un área geográfica dada, que abarca la variedad de especies y la variedad dentro de cada una.

biogeografía Estudio de la distribución geográfica de las plantas y animales y los cambios en la misma a lo largo del tiempo.

bioma Área de la Tierra que se puede clasificar en función de la flora y fauna que contiene.

biomasa Cantidad total de un organismo dado en un hábitat, expresada por lo general como peso o volumen. También, tipo de combustible hecho de materia orgánica que suele quemarse para generar electricidad.

biosfera Capa de la Tierra en la que la vida puede existir, situada entre la atmósfera y la litosfera; suma de todos los ecosistemas del planeta.

bucle de retroalimentación Efecto que tiene una parte del ecosistema sobre el resto, y cómo este cambio se retroalimenta en el sistema en su conjunto.

cadena trófica Serie de depredadores y presas en la que cada organismo depende para alimentarse de otro precedente.

calentamiento global Aumento gradual de la temperatura de la atmósfera terrestre causado por la acumulación de gases de efecto invernadero.

cambio climático Desplazamiento de los patrones climáticos interconectados del mundo; un proceso natural gradual exacerbado por la actividad humana.

capa de ozono Parte del nivel superior de la atmósfera terrestre, con una concentración más alta de moléculas de ozono (O_3), que protege de la radiación ultravioleta.

cascada trófica Impacto que tiene la retirada de uno de los niveles en una cadena trófica de al menos tres niveles sobre el conjunto del ecosistema.

catastrofismo Teoría según la cual los cambios de la corteza terrestre se debieron a raros acontecimientos catastróficos, opuesta al cambio gradual a lo largo del tiempo.

célula Unidad biológica y estructural más pequeña capaz de sobrevivir por sí misma; las células son los elementos constructivos de la vida en la Tierra.

ciencia ciudadana Investigación científica realizada por aficionados, consistente por lo general en tomas de datos a gran escala.

clímax Se aplica a una comunidad biológica o ecosistema que ha alcanzado un punto en el que sus poblaciones de organismos permanecen estables. Es el resultado final de la sucesión, en la que los tipos de especies y tamaños de población que componen una comunidad cambian con el tiempo.

combustible fósil Combustible no renovable formado a lo largo de millones de años a partir de restos de plantas y animales.

comunidad biológica Conjunto de organismos vivos que viven en un lugar; combinado con el medio ambiente, forma un ecosistema.

conservación Protección y preservación de la flora, la fauna y los recursos naturales.

consumidor Especie que obtiene nutrientes alimentándose de otros organismos; el término se aplica a cualquier organismo que no esté en la base de la cadena trófica.

contaminación Introducción de sustancias dañinas en el medio que producen cambios en la atmósfera.

deforestación Tala de un área extensa de bosque, realizada con fines diversos, como la agricultura, la industria o la construcción.

depredador Especie que caza a otra especie para alimentarse.

descomponedor Organismo, principalmente una bacteria o un hongo, que descompone organismos muertos y material de desecho para obtener energía.

detritívoro Organismo que se alimenta de detritos o residuos.

diatomea Uno entre un grupo amplio de algas microscópicas que desempeñan un papel importante para estabilizar los ecosistemas y facilita la existencia de una gama de formas de vida.

diversidad Variedad de especies en una comunidad biológica o ecosistema.

ecología Estudio científico de las relaciones entre los seres vivos y su medio ambiente.

ecología de comunidades Estudio de cómo interactúan las especies en un espacio geográfico dado.

ecología del comportamiento Estudio del comportamiento animal y de cómo influyen en el mismo las presiones ecológicas.

ecosistema Comunidad de organismos en un medio dado que interactúan entre sí y se afectan mutuamente.

efecto invernadero Modo en que los gases de la atmósfera terrestre atrapan el calor. La acumulación de estos gases conduce al calentamiento global.

energía renovable *Véase* recurso renovable.

epidemiología Estudio de cómo se difunden las enfermedades por las poblaciones, y el impacto que esto tiene en el conjunto del ecosistema.

especie Grupo de organismos capaz de intercambiar genes por medio de la reproducción.

especie clave Especie que desempeña un papel fundamental en un ecosistema, con frecuencia desproporcionado en relación con su biomasa, y cuya retirada altera o pone en peligro el ecosistema entero.

especie clímax Especie de planta que no cambia mientras su medio permanezca estable.

especie invasora Especie no nativa que se introduce en un ecosistema y se difunde rápidamente, dañando el equilibrio ecológico de la zona.

estocasticidad Fluctuaciones impredecibles de las condiciones ambientales que afectan a las poblaciones y los procesos ecológicos.

etología Estudio científico de la evolución del comportamiento animal como rasgo adaptativo, centrado en la observación de los animales en su hábitat natural.

evolución Proceso por el que las especies cambian con el tiempo mientras se heredan las características de generación en generación.

expansión urbana Crecimiento hacia afuera de un área urbanizada densa, a menudo con consecuencias negativas para el medio ambiente; o «dispersión urbana».

extinción Desaparición permanente de una especie entera.

extinción masiva Desaparición rápida de un número anormalmente grande –al menos la mitad– de todas las especies; este cambio pronunciado de la biodiversidad normalmente marca el cambio a una nueva era geológica en la historia del planeta.

extirpación Extinción de una especie en un ámbito local: esta desaparece de un área geográfica dada, pero existe aún en otra parte del planeta.

fertilizante Sustancia, ya sea natural o química, que se añade al suelo para aumentar su contenido en nutrientes y favorecer el crecimiento vegetal.

fisiología Rama de la biología que estudia las funciones y los mecanismos de los seres vivos.

fósil Resto de un organismo prehistórico, conservado y solidificado en roca sedimentaria o en ámbar.

fotosíntesis Proceso por el que las plantas y algas convierten la

energía lumínica del sol en energía química, en forma de glucosa que circulará por la cadena alimenticia. En el proceso se absorbe dióxido de carbono y se libera oxígeno.

fracking *Véase* fractura hidráulica.

fractura hidráulica Proceso de extracción de petróleo o gas del subsuelo consistente en perforar e inyectar agua en la roca a alta presión para expulsar el petróleo o gas hacia la superficie.

gas de efecto invernadero Gas, como el dióxido de carbono y el metano, que absorben la energía que refleja la superficie terrestre, impidiendo que escape al espacio.

gen Unidad más básica de la herencia; parte de una molécula de ADN que transmite características de una generación a otra.

genoma Totalidad de los genes de un individuo o una especie.

geología Estudio científico de la formación y estructura de la Tierra. Los geólogos estudian la historia del planeta y los procesos que lo afectan.

hábitat Área en la que vive naturalmente un organismo.

herbívoro Organismo que se alimenta solo de plantas.

herencia Transmisión de rasgos genéticos y predisposiciones de comportamiento a la descendencia, tanto por medio de la información genética como del cuidado parental.

homeostasis Autorregulación de la constancia de las propiedades de un sistema u organismo, tales como la temperatura, el agua y el dióxido de carbono, para mantener un estado interno estable.

hongos Grupo de organismos, que incluye las setas, que producen esporas y se alimentan de materia orgánica. A diferencia de las plantas, los hongos no emplean luz solar para crecer.

irrigación Aporte controlado de agua a áreas de tierra, generalmente por medio de canales, para regar los cultivos.

lluvia ácida Toda forma de precipitación con altos niveles de acidez que causan daños al medio; puede darse de forma natural o debido a la actividad humana.

metabolismo Procesos químicos que tienen lugar en las células de un organismo para mantenerlo con vida, tales como los que permiten la digestión.

metacomunidad Conjunto de comunidades independientes que interactúan y están conectadas por el movimiento de algunas especies de una a otra.

metapoblación Conjunto de poblaciones menores de una especie dada, vinculadas por el movimiento de algunos individuos.

micorriza Asociación, por lo general simbiótica, entre ciertos hongos y las raíces de una planta, con beneficios para ambos.

microorganismo Organismo invisible al ojo humano y visible solo al microscopio, como las bacterias, los virus y los hongos; también llamado microbio.

migración Desplazamiento a gran escala de una especie de un medio ambiente a otro, de modo estacional por lo general.

monocultivo Uso de la tierra para el cultivo de un solo tipo de planta. Suele tener efectos dañinos para la tierra, al reducir su riqueza mineral.

morfología Estudio de la estructura externa de los organismos.

movimiento verde Ecologismo; ideología política que defiende la importancia del medio ambiente y reclama medidas para impedir el daño a los hábitats naturales de la Tierra.

mutación Cambio de estructura en el ADN de un organismo, que puede resultar en una transformación genética que confiere rasgos inhabituales. Un ejemplo de mutación es el albinismo, o ausencia de pigmentación.

mutualismo Situación en la que dos o más organismos dependen uno del otro para sobrevivir.

nicho Espacio concreto que ocupa y papel que tiene una especie en un ecosistema.

nidada Puesta de huevos; su tamaño es el número de huevos puestos.

nivel trófico Lugar de un organismo en la jerarquía de un ecosistema; los organismos que están en el mismo nivel de la cadena trófica están en el mismo nivel trófico.

omnívoro Organismo que se alimenta tanto de plantas como de animales.

organismo Término general para cualquier ser vivo, desde bacterias unicelulares hasta formas de vida multicelulares complejas como las plantas y los animales.

organismo genéticamente modificado Toda forma de vida que ha sido artificial y químicamente alterada por técnicas de ingeniería que modifican el ADN.

paleontología Estudio de los fósiles y la biología del pasado geológico de la Tierra. La paleobotánica es la rama que estudia los fósiles de plantas.

parásito Organismo que vive sobre otro o dentro de otro organismo del que obtiene nutrientes.

placa tectónica Sección de la corteza y del manto superior terrestres que se desplaza de manera gradual, causando la expansión del lecho oceánico y la deriva continental, y formando montañas, fallas, volcanes y terremotos en sus límites.

planta vascular Tipo de planta con tejidos que conduce agua y minerales por toda ella, como los helechos y las plantas con flor.

polinización Transferencia de polen de una planta masculina a otra femenina –por aves, insectos, otros animales o por el viento– que permite la fertilización y la producción de semillas.

presa Especie cazada por otra especie.

principio de exclusión competitiva Idea según la cual no pueden coexistir dos o más especies que dependan de exactamente los mismos recursos sin que una de las poblaciones crezca y la otra decaiga, ya que una siempre tendrá ventaja sobre otra.

productor primario Todo organismo que produce su propio alimento a partir de fuentes no orgánicas, como la luz, o compuestos químicos, como el dióxido de carbono o el azufre, siendo así el sustento de los animales que se alimentan del mismo.

reciclaje Proceso de convertir desechos en nuevos objetos o materiales, o de su combustión para generar energía.

recurso renovable Fuente de energía no finita, como las de las energías solar, hidráulica y eólica.

red trófica Conjunto de cadenas tróficas dentro de un ecosistema y los vínculos entre ellas, que ilustran cómo interactúan las comunidades para sobrevivir.

selección de parentesco Estrategia evolutiva por la que los individuos aplican la mejor estrategia para la supervivencia de sus parientes, incluso a costa de su propia seguridad, bienestar o reproducción.

selección natural Proceso por el que se transmiten de modo preferente las características que mejoran las posibilidades de reproducirse de un organismo.

servicio ecosistémico Beneficio que reciben los seres humanos de un ecosistema; este término subraya la importancia del medio ambiente para la humanidad.

sobrepesca Agotamiento de la población de peces de un área dada como resultado de la pesca excesiva.

sucesión Proceso por el que una comunidad biológica evoluciona a lo largo del tiempo, desde unas pocas especies simples hasta un ecosistema complejo, por medio del impacto de las especies sobre el medio.

superdepredador Depredador que no es presa de ninguna otra especie.

taxonomía Ciencia de nombrar y clasificar los diferentes organismos.

termorregulación Conjunto de procesos internos de un organismo para el mantenimiento de una temperatura estable, una función esencial para la supervivencia.

trabajo de campo Estudio realizado en el medio natural, en lugar de en condiciones controladas de laboratorio.

transmutación Proceso de divergencia evolutiva por el que una especie se transforma en otra enteramente nueva.

trópico Región de la Tierra que rodea el ecuador, entre las líneas del trópico de Cáncer y el de Capricornio, y que no experimenta los mismos cambios estacionales que el resto de la Tierra.

variación Diferencias dentro de una especie, debidas a factores genéticos o ambientales.

vegetación primaria Vegetación que ha predominado en un área dada desde que comenzaron las condiciones climáticas actuales.

FUENTES DE LAS CITAS

HISTORIA DE LA EVOLUCIÓN

PROCESOS ECOLÓGICOS

ORDENANDO EL MUNDO NATURAL

LA DIVERSIDAD DE LA VIDA

ECOSISTEMAS

ORGANISMOS EN UN ENTORNO CAMBIANTE

LA TIERRA VIVA

EL FACTOR HUMANO

ECOLOGISMO Y CONSERVACIÓN

AGRADECIMIENTOS

Dorling Kindersley agradece al profesor Fred D. Singer su ayuda en la planificación de este libro, a Monam Nishat y Roshni Kapur su colaboración en el diseño, y a Anita Yadav su ayuda en la maquetación.

CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS

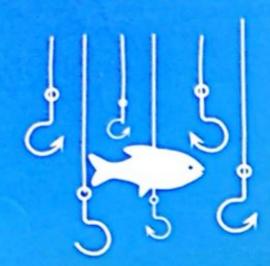
El editor agradece a las siguientes personas e instituciones el permiso para usar sus imágenes:

(Clave: a-arriba; b-abajo; c-centro; i-izquierda; d-derecha; s-superior)

21 Alamy Stock Photo: The Picture Art Collection (sd); The Natural History Museum (bi). **22 Alamy Stock Photo:** North Wind Picture Archives (bd). **26 Rex by Shutterstock:** Granger (bi). **29 Alamy Stock Photo:** Kamal Bhatt (si); Laurentiu Iordache (cdb). **30 Alamy Stock Photo:** Blickwinkel (s). **31 Alamy Stock Photo:** Cultura RM (cdb). Dorling Kindersley: Frank Greenaway / Natural History Museum, Londres (cb). **33 Alamy Stock Photo:** Pictorial Press Ltd (sd). Dreamstime.com: Gordana Sermek (bc). **35 Alamy Stock Photo:** Alexander Heinl / Dpa Picture Alliance / Alamy Live News (cdb). Science Photo Library: A. Barrington Brown © Gonville & Caius College (cia). **36 Science Photo Library:** Pascal Goetgheluck (cib). **37 Alamy Stock Photo:** BSIP SA (si). **39 SuperStock:** Animals Animals (cia); Guillem López / Age fotostock (sd). **46 Alamy Stock Photo:** Historic Collection (bi). **47 Getty Images:** Adam Jones (ca). **49 Science Photo Library:** Nigel Cattlin (sd). **51 Getty Images:** Pete Oxford / Minden Pictures (cia). **53 iStockphoto.com:** Stefonlinton (cia). **54 Alamy Stock Photo:** Suzanne Long (bc). **57 Ardea:** © Gregory G. Dimijian M.D. / Scie (cia). Science Photo Library: Gilbert S. Grant (bd). **59 Depositphotos Inc:** Andaman (b). **62 Alamy Stock Photo:** Richard Ellis (b). **63 Alamy Stock Photo:** Kevin Schafer (sd). **64 Cortesía del National Park Service, Lewis and Clark National Historic Trail:** (bi). **65 Alamy Stock Photo:** Nick Upton (si). **67 Alamy Stock Photo:** Avalon / Photoshot License (sd). Getty Images: Roger Tidman (bi). **69 Alamy Stock Photo:** GL Archive (bd); Pictorial Press Ltd (cda). **70 Alamy Stock Photo:** M.Brodie (cib); David speight (sd). **73 Alamy Stock Photo:** PF-(bygone1) (sd). **Getty Images:** Fritz Polking (bi). **75 Alamy Stock Photo:** Nigel Cattlin (bi). **Getty Images:** Visuals Unlimited, Inc. / Anne Weston / Cancer Research UK (b). **77 Alamy Stock Photo:** David Lester (cia). **83 Getty Images:** Douglas Klug (cda); DEA Picture Library (bi). **85 Alamy Stock Photo:** Art Collection 3 (bi); Science History Images (cda). **87 Alamy Stock Photo:** ART Collection (sd); Florilegius (bi). **89 Alamy Stock Photo:** Jeff J Daly (cib). **90 Getty Images:** Shawn Walters / EyeEm (bd). **91 Alamy Stock Photo:** Henri Koskinen (cdb). **94 Getty Images:** Bettmann (si); Education Images (bd). **95 Alamy Stock Photo:** De Luan (si). **96 Alamy Stock Photo:** Marka (bd). **97 Getty Images:** Denver Post (sd). **103 Alamy Stock Photo:** BSIP SA (bi); Historic Images (sd). **104 Science Photo Library:** Dr. Merton Brown, Visuals Unlimited (cd). **105 Alamy Stock Photo:** Blickwinkel (cdb). **109 Alamy Stock Photo:** Wildlife GmbH (cdb), DP Wildlife Invertebrates (ca). **110 Alamy Stock Photo:** Vince Burton (cib). **Getty Images:** Universal History Archive (sc). **111 Alamy Stock Photo:** Ingo Oeland (bd). **112 Science Photo Library:** Wim Van Egmond (bd). **113 Alamy Stock Photo:** Biosphoto (s). **114 Dreamstime.com:** Bernard Foltin (bd). **115 SuperStock:** Minden Pictures (bd). **116 Alamy Stock Photo:** Austrian National Library / Interfoto (cda). **117 Getty Images:** Rolls Press / Popperfoto (bi). **121 Dreamstime.com:** Mark Higgins (cda). **Getty Images:** CBS Photo Archive (bi). **122 Getty Images:** Michael Nichols (s). **123 naturepl.com:** Anup Shah (bd). **124 Getty Images:** Dr Clive Bromhall (bd); Dan Kitwood / Staff (si). **125 Alamy Stock Photo:** Terry Whittaker Wildlife (bd). **127 Alamy Stock Photo:** Oliver Christie (cia). **Getty Images:** Alastair Macewen (bd). **133 Getty Images:** Wildestanimal (cda). **135 Alamy Stock Photo:** The Picture Art Collection (bi). **iStockphoto.com:** Vlad61 (cda). **136 Alamy Stock Photo:** A.P.S. (RU) (sd). **137 Getty Images:** Olaf Protze (bd). **139 Alamy Stock Photo:** The Natural History Museum (cia). **Science Photo Library:** Ted Kinsman (cdb). **141 Alamy Stock Photo:** Danita Delimont (cia). **142 Alamy Stock Photo:** Dennis Frates (bi). **143 Alamy Stock Photo:** World History Archive (si). **Getty Images:** Fine Art (cdb). **146 Alamy Stock Photo:** Mark Lisk (sd). **147 Cortesía del Marlboro College:** www.marlboro.edu (sd). **149 Alamy Stock Photo:** age fotostock (si). **Getty Images:** Universal History Archive / UIG (bd). **151 Alamy Stock Photo:** Jason Bazzano (cia). naturepl.com: Paul Williams (bd). **153 Alamy Stock Photo:** Bill Crnkovich (cdb). **155 Alamy Stock Photo:** Blickwinkel (ca). **156 North Carolina State University:** Rebecca Kirkland (c). **163 Alamy Stock Photo:** Greg Basco / BIA / Minden Pictures (cb); Pictorial Press Ltd (sd). **165 Alamy Stock Photo:** GL Archive (sd). **Science Photo Library:** Solvin Zankl / Visuals Unlimited, Inc. (bi). **166 NASA:** Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team, NASA / GSFC (cdb). **168 Alamy Stock Photo:** Emmanuel Lattes (cd). **169 Alamy Stock Photo:** RWI Fine Art Photography (bd). **170 Alamy Stock Photo:** Robert K. Olejniczak (cdb). **173 Dreamstime.com:** Anton Foltin (cda). **175 Dreamstime.com:** Claudio Balducelli (cia). **176 Alamy Stock Photo:** All Canada Photos (bd). **180 U.S.F.W.S:** (sd). **181 Alamy Stock Photo: Everett Collection Inc** (sd); **Ian west** (bi). **182 Dreamstime.com:** Yuval Helfman (si). **183 Alamy Stock Photo:** Natural History Archive (sd). **185 naturepl.com:** Mary McDonald (cdb). **187 naturepl.com:** Jussi Murtosaari (bi). **Rex by Shutterstock:** Antti Aimo Koivisto (sd). **189 Alamy Stock Photo:** David Hall (si); Genevieve Vallee (bd). **191 Alamy Stock Photo:** Mauritius images GmbH (bi). **Getty Images:** Danita Delimont (cda). **193 Alamy Stock Photo:** Adam Burton (si). **198 Getty Images:** Philippe Lissac / GODONG (bc). **199 Alamy Stock Photo:** Rolf Nussbaumer Photography (cdb). Depositphotos Inc: swisshippo (cia). **201 Dreamstime.com:** Rvo233 (cia). **Getty Images:** Hulton Archive / Stringer (sd). **202 IPCC :** FAQ 1.3, Figura 1 de Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: «Historical Overview of Climate Change», en *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, RU y Nueva York (EE UU) (bd). **203 Getty Images:** Wolfgang Kaehler / LightRocket (cdb). **205 Alamy Stock Photo:** Sputnik (sd). **iStockphoto.com:** Totajla (si). **207 Alamy Stock Photo:** Suzanne Long (sd). **SuperStock:** Wolfgang Kaehler (bi). **209 Depositphotos Inc:** Pawopa3336 (si). **Getty Images:** DEA / C.DANI / I. JESKE (cdb). **210 Getty Images:** R A Kearton (cd). **211 Alamy Stock Photo:** ClassicStock (bd). **212 Dorling Kindersley:** Dorling Kindersley: Colin Keates / Natural History Museum, Londres (cda). **213 Alamy Stock Photo:** AustralianCamera (cib). **215 Alamy Stock Photo:** Ancient Art and Architecture (bc). **Getty Images:** Terry Smith (sd). **216 Alamy Stock Photo:** Iuliia Bycheva (sd). **217 iStockphoto.com:** Zhongguo (bd). **220 Science Photo Library:** Detlev Van Ravenswaay (sd). **221 Alamy Stock Photo:** Pictorial Press Ltd (sd). **223 Getty Images:** The Washington Post (cdb). **225 Alamy Stock Photo:** Arterra Picture Library (cia). **Getty Images:** Magnus Kristensen / AFP (cdb). **233 Alamy Stock Photo:** Chronicle (bd). **Getty Images:** Sonu Mehta / Hindustan Times (bi). **234 Alamy Stock Photo:** Design Pics Inc (b). **Unicef:** (sd). **235 UNSW:** Aran Anderson (si). **237 Alamy Stock Photo:** Archive Pics (sd). **iStockphoto.com:** 4kodiak (cia). **238 Alamy Stock Photo:** Paul Kennedy (bc). **239 Alamy Stock Photo:** ImageBroker (cdb); Huang Zongzhi / Xinhua / Alamy Live News (si). **241 Alamy Stock Photo:** Arctic Images (bd). **Science Photo Library:** Simon Fraser / Mauna Loa Observatory (cia). **244 Alamy Stock Photo:** Walter Oleksy (bi). **Science Photo Library:** CDC (sd). **247 iStockphoto.com:** Harry Collins (bd). **248 Alamy Stock Photo:** Christopher Pillitz (bc). **249 Gene E. Likens:** On Location Studios, Poughkeepsie, NY (sd). **250 Alamy Stock Photo:** North Wind Picture Archives (bc). **251 Getty Images:** Peter Charlesworth (cdb). **Dr Max Roser:** Esteban Ortiz-Ospina (2018) «World Population Growth». Publicado *online* en OurWorldInData.org. Extraído de: https://ourworldindata.org/world-population-growth (cia). **252 Alamy Stock Photo:** Renault Philippe / Hemis (cd). **253 Alamy Stock Photo:** Danita Delimont (cdb). **256 Getty Images:** Brazil Photos (bd). **257 Getty Images:** Antonio Scorza / Staff (sd). **258 Getty Images:** Michael Duff (b). **259 Getty Images:** Micheline Pelletier Decaux (bd). MongaBay.com: Rhett Butler / rainforests.mongabay.com (si). **261 Getty Images:** Orlando / Stringer (cdb). **NASA:** Jesse Allen (cia). **263 Getty Images:** Orjan F. Ellingvag / Corbis (cia); Fairfax Media (sd). **264 Dreamstime.com:** Oliver Förstner (cdb). **265 Alamy Stock Photo:** IanDagnall Computing (s). **267 Alamy Stock Photo:** Poelzer Wolfgang (bd). **268 John M. Yanson:** (si). **269 Alamy Stock Photo:** Science History Images (bd). **Getty Images:** Barcroft Media (bi). **271 Getty Images:** Scott Tilley (cia). **NSW Department of Primary Industries:** Dr Steven McLeod (cda). **272 123RF.com:** Stephen Goodwin (cdb). **273 Alamy Stock Photo:** Jack Picone (sd). **277 Alamy Stock Photo:** Gay Bumgarner (cda). **Camille Parmesan:** Marsha Miller, University of Texas at Austin (bi). **278 Getty Images:** Bianka Wolf / EyeEm (bi). **279 Alamy Stock Photo:** Andrew Darrington (si). **280 iStockphoto.com:** ca2hill (cd). **282 Alamy Stock Photo:** Christian Hütter (bi). **283 Getty Images:** Hector Vivas (sd). **284 Getty Images:** Peter Parks / AFP (bd). **285 Ardea:** Paulo de Oliveira (bd). **288 Getty Images:** AFP / Stringer (sd). **289 Getty Images:** Jim Russell (bi). **290 Alamy Stock Photo:** ImageBroker (si). **Mesfin Mekonnen and Arjen Hoekstra:** (2016) http://advances.sciencemag.org/content/2/2/e1500323 (b). **291 Alamy Stock Photo:** Russotwins (cdb). **296 Alamy Stock Photo:** Granger Historical Picture Archive (bc). **298 Alamy Stock Photo:** The Granger Collection (bc). **299 Getty Images:** DEA / Biblioteca Ambrosiana / De Agostini (cd). **302 Alamy Stock Photo:** Jim West (bd). **303 Getty Images:** Bloomberg / impreso con permido del Joint Center for Artificial Photosynthesis - California Institute of Technology (cdb). **304 Getty Images:** TPG (b). **305 IEA:** © OECD/IEA [2016], Renewables Information, IEA Publishing. Licence: www.iea.org/t &c<http://www.iea.org/t&c> (sd). **307 Alamy Stock Photo:** Jonathan Plant (ca). **Rex by Shutterstock:** AP (sd). **309 Alamy Stock Photo:** Steve Morgan (cia); Friedrich Stark (sd). **311 Alamy Stock Photo:** Flowerphotos (sd). **313 Alamy Stock Photo:** Rick & Nora Bowers (bd). **Ardea:** © USFWS / Science Source / Science S (cia). **314 Getty Images:** Design Pics / Richard Wear (s). **315 Rex by Shutterstock:** Chuck Graham / AP (sd). **318 Getty Images:** Digital First Media / Inland Valley Daily Bulletin via Getty Images (sd). **319 Rex by Shutterstock:** Eric Lee / Lawrence Bender Prods. / Kobal (b). **320 Rex by Shutterstock:** Mohammed Seeneen / AP (sd). **323 Getty Images:** Hero Images (cda). NOAA: (bi). **324 Getty Images:** Tony Karumba (bd). **325 Getty Images:** Paul J. Richards / Staff (sd). **326 Alamy Stock Photo:** Inga Spence (cd). **327 iStockphoto.com:** pixelfusion3d (cb). **Rex by Shutterstock:** AGF s.r.l. (sd). **328 Getty Images:** Amana Images Inc (cd). **329 Stanford News Service:** Linda A. Cicero (sd). **331 Getty Images:** Ted Aljibe / Staff (cdb).

Las demás imágenes © Dorling Kindersley
Para más información: **www.dkimages.com**

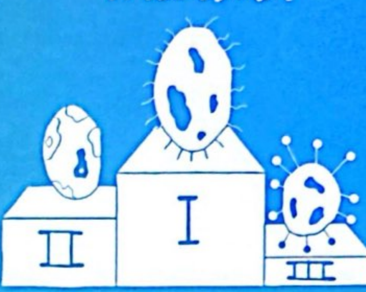
BARCOS CADA VEZ MAYORES PARA PECES MENORES Y MÁS ESCASOS





SALVAD LA BIOSFERA Y PODRÉIS SALVAR EL MUNDO

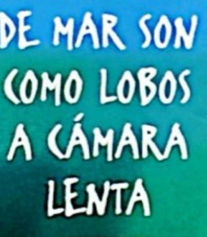
LOS MICROBIOS TENDRÁN LA ÚLTIMA PALABRA

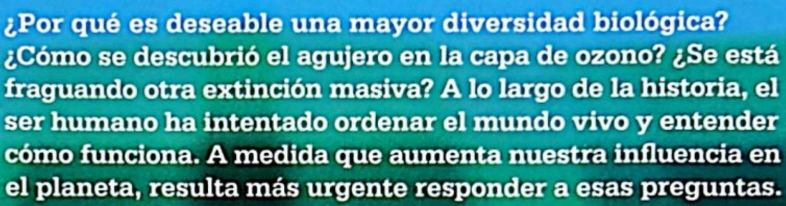




SI SE IGNORA EL NOMBRE DE LAS COSAS, SE PIERDE EL CONOCIMIENTO DE ELLAS

LOS CARACOLES DE MAR SON COMO LOBOS A CÁMARA LENTA

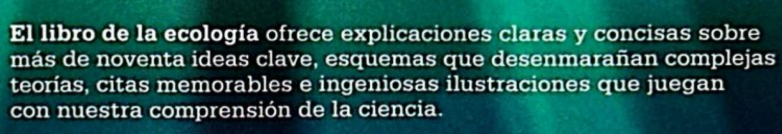




¿Por qué es deseable una mayor diversidad biológica? ¿Cómo se descubrió el agujero en la capa de ozono? ¿Se está fraguando otra extinción masiva? A lo largo de la historia, el ser humano ha intentado ordenar el mundo vivo y entender cómo funciona. A medida que aumenta nuestra influencia en el planeta, resulta más urgente responder a esas preguntas.

El libro de la ecología ofrece explicaciones claras y concisas sobre más de noventa ideas clave, esquemas que desenmarañan complejas teorías, citas memorables e ingeniosas ilustraciones que juegan con nuestra comprensión de la ciencia.

Tanto el neófito en la materia como el ávido estudiante del mundo vivo, así como cualquiera preocupado por los efectos de la acción humana en el planeta, hallarán en este libro abundante material para satisfacer su curiosidad.





CON LA AYUDA DEL MICROSCOPIO, NADA ESCAPA AL ESTUDIO

ESTAMOS EN LA FASE INICIAL DE UNA EXTINCIÓN MASIVA



VIVIMOS EN ESTE PLANETA COMO SI TUVIÉRAMOS OTRO PLANETA A DONDE IR



www.dkespañol.com



EL CAMBIO CLIMÁTICO ESTÁ OCURRIENDO AQUÍ Y AHORA



ISBN: 978-0-2414-1998-4